



Consommation des plats traditionnels à base de niébé au Bénin et impact des procédés de transformation sur la qualité nutritionnelle des plats fréquemment consommés (cas des beignets de niébé)

Fifamè Lorène Akissoe

► To cite this version:

Fifamè Lorène Akissoe. Consommation des plats traditionnels à base de niébé au Bénin et impact des procédés de transformation sur la qualité nutritionnelle des plats fréquemment consommés (cas des beignets de niébé). Médecine humaine et pathologie. Université Montpellier; Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 2021. Français. NNT : 2021MONTG067 . tel-03658008

HAL Id: tel-03658008

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03658008>

Submitted on 3 May 2022

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

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

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

En Nutrition et Sciences des Aliments

École doctorale GAIA – Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau
Portée par

L'Unité mixte de recherche Qualisud

En partenariat international avec l'Ecole Doctorale des Sciences Agronomiques et de l'Eau de l'Université d'Abomey-Calavi (EDSAE/UAC) BENIN

**Consommation des plats traditionnels à base de niébé au Bénin
et impact des procédés de transformation sur la qualité
nutritionnelle des plats fréquemment consommés (cas des
beignets de niébé)**

Présentée par Fifamè Lorène AKISSOE

Le 28 Septembre 2021

Sous la direction de Dr. Claire Mouquet-Rivier

et Prof. D. Joseph Hounhouigan

Devant le jury composé de

Valérie Micard, Professeur Montpellier Supagro (France)

Présidente du jury

Emile Kou'santa Sabiba AMOUZOU, Professeur Titulaire, Université de Kara (Togo)

Rapporteur

Ronan Symoneaux, Chargé de recherche ESA, HDR (France)

Rapporteur

Waliou Amoussa-Hounkpatin, Enseignant-Chercheur, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

Examinateur

Claire Mouquet-Rivier, Directrice de recherche IRD, UMR QualiSud (France)

Directrice de thèse

D. Joseph HOUNHOUIGAN, Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

Co-Directeur de thèse



**UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER**

Résumé

Le niébé (*Vigna unguiculata*), légumineuse emblématique d'Afrique de l'Ouest, présente un potentiel nutritionnel important de par ses teneurs élevées en protéines et micronutriments dont les apports sont généralement reconnus comme insuffisants dans les régimes alimentaires des populations des pays du Sud. Au Bénin, l'urbanisation pourrait entraîner une moindre consommation du niébé et/ou des modifications des formes de préparation et de consommation, dont les procédés très contrastés pourraient impacter leur qualité nutritionnelle.

Dans le cadre de cette thèse, deux principaux volets ont été abordés : la consommation des plats de niébé et l'étude des procédés de transformation sur la qualité nutritionnelle.

L'étude de la consommation de neuf plats traditionnels à base de niébé a été réalisée au travers d'une enquête de fréquence de consommation alimentaire auprès de 1217 adultes provenant de Cotonou (zone urbaine), Adjohoun et Allada (zones rurales). Des échantillonnages des plats ont été réalisés auprès de restauratrices locales et leurs compositions nutritionnelles (composition globale, minéraux, thiamine, folate) ont été déterminées. La contribution des plats de niébé aux apports journaliers recommandés (AJRs) en plusieurs nutriments a été estimée. Les principaux facteurs limitants la consommation du niébé, les perceptions des consommateurs et les évolutions de consommation entre différentes générations (jeunes, adultes, grands-parents) ont été identifiés grâce à la réalisation de groupes de discussion dirigée.

Concernant le second volet, les effets des procédés traditionnels de fabrication des beignets de niébé Ata et Ata-doco sur leur valeur nutritionnelle ont été étudiés par la caractérisation biochimique des produits intermédiaires et finaux collectés auprès des productrices locales ou réalisés au laboratoire en vue d'identifier les étapes critiques. Une approche de modélisation a été utilisée pour déterminer les itinéraires de transformation optimaux.

Le niébé est très consommé car seulement 2% de la population interrogée n'en consommaient pas à Cotonou et dans les zones rurales. En moyenne au cours de la semaine précédent les enquêtes, la contribution nutritionnelle aux AJR des plats à base de niébé était d'environ 40% pour les fibres et le magnésium, 30% pour les folates, 20% pour les protéines, plus de 15% pour le zinc et potassium, et 13% pour la thiamine. Cependant, les contributions pour le fer et le calcium étaient très faibles.

Les quantités totales journalières en équivalent graines de niébé étaient de 71 g et 58 g/adulte respectivement à Cotonou et en zones rurales. Les freins à la consommation étaient principalement liés à la faible disponibilité de certaines recettes traditionnelles. Toutefois, les problèmes digestifs ont été également identifiés.

L'étude des procédés traditionnels des beignets a permis d'identifier le trempage (environ 50% de perte en folates et 30% pour les alpha-galactosides pour la production de Ata) et la friture (production Ata et Ata-doco, absorption d'huile importante) comme les étapes impactant fortement la valeur nutritionnelle, par des phénomènes de diffusion et/ou de dégradation. Ainsi, pour l'optimisation de ces étapes, deux composés ayant des effets contrastés (thiamine et alpha-galactosides respectivement vitamine et facteur de flatulence) ont été ciblés. Des scénarios de transformation visant à optimiser la valeur nutritionnelle (thiamine, alpha-galactosides) ont été proposés et devraient faire l'objet d'une promotion auprès des transformatrices locales.

La consommation régulière des plats traditionnels de niébé contribue de manière significative à la couverture des besoins nutritionnels et doit être encouragée.

Mots-clés : niébé, plats traditionnels, besoins nutritionnels, minéraux, folates, thiamine, alpha-galactosides, modélisation

Abstract

Cowpea (*Vigna unguiculata*), an emblematic legume of West Africa, presents an important nutritional potential due to its high protein and micronutrient content, which is generally recognized as insufficient in the diets of populations in the South. In Benin, urbanization could lead to lower consumption of cowpea or changes in consumption of the cowpea dishes, which processing are sometimes very critical and could impact their nutritional quality.

In this study, two main aspects were addressed: the consumption of cowpea dishes and the study of the impact of cowpea-based doughnuts on their nutritional quality.

The study of the consumption of nine traditional cowpea-based dishes was carried out through a food frequency questionnaire (FFQ) survey among 1217 adults from Cotonou (urban area), Adjohoun and Allada (rural areas). Cowpea dishes were sampled from local producers and their nutritional composition (proximate composition, minerals, thiamine, folate) was determined. The contribution of cowpea dishes to the recommended nutrient intake (RNI) was estimated. The main factors limiting cowpea consumption, consumer perceptions, and changes in consumption between different generations (youth, adults, grandparents) were identified through focus group discussions.

The study of the impact of traditional processing of cowpeas doughnuts on their nutritional quality was performed through the sampling of products generated during the main steps of the processing and chemical analysis in the laboratory to identify critical steps influencing some nutrients of interest (B1 or B9 vitamin) for optimization purpose using a modeling approach.

Our results showed that cowpeas are widely consumed, with only 2% of the population surveyed not consuming them in Cotonou and rural areas. On average during the week before the surveys, the nutritional contribution of all cowpea dishes combined was around 40% for dietary fibre, 30% for folate, 20% for protein, more than 15% for zinc and potassium, and 13% for thiamine. However, the contributions to the RNIs for iron and calcium were very low.

The total daily quantities in cowpea seed equivalent were 71 g and 58 g/adult in Cotonou and rural areas, respectively. Barriers to consumption were mainly related to the lack of availability of some traditional recipes. However, digestive problems were also identified by the respondents.

The study of traditional doughnut processing allowed identifying the soaking (about 50% loss of folates and 30% loss of alpha-galactosides for the production of Ata) and frying (production of Ata and Ata-doco, high oil absorption) as the unit operations that have a strong impact on the nutritional value. For the optimization of these steps, thiamine, and alpha-galactosides, which are vitamin and flatulence causing components respectively were targeted for optimization. Modeling of the changes in the contents of both components showed that their losses were mainly through diffusion into the soaking water. Processing scenarios aimed at optimizing the nutritional value were proposed and should be promoted to local processors.

In conclusion, the regular consumption of traditional cowpea dishes should be maintained given that they contribute significantly to nutritional requirements.

Keywords : cowpea, traditional dishes, nutritional contribution, minerals, folate, thiamine, alpha-galacto-oligosaccharide, modeling

Dédicace

A toi Maman je dédie ce document qui est le fruit de trois années de recherche.

Grâce à toi j'ai appris à avoir confiance en moi et être forte devant les difficultés.

Je sais que de là où tu es, tu te réjouis de me voir passer ce cap.

Tu es et resteras à jamais dans mon cœur.

All is grace!



Remerciements

A travers ces lignes rédigées avec un réel plaisir, je voudrais exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui ont directement ou indirectement participé à la concrétisation de cette étape cruciale de ma vie.

Je tiens à remercier mes directeurs de thèse, *Claire Mouquet-Rivier et Professeur Joseph Hounhouigan*, qui m'ont sélectionnée pour participer à la réalisation de ces travaux de recherche, qui fut pour moi un parcours très bénéfique professionnellement et sur le plan personnel. Cette opportunité m'a permis de redécouvrir les recettes traditionnelles à base de niébé de mon pays et d'apprendre davantage sur le plan scientifique. A *Claire Mouquet-Rivier*, merci pour ton encadrement très enrichissant durant ces trois années malgré ton agenda chargé. Au *Professeur D. Joseph Hounhouigan*, merci pour vos précieuses remarques et suggestions ainsi que pour la confiance que vous m'avez toujours témoignée. Je n'oublierai pas l'équipe d'encadrement : *Youna Hemery* pour sa rigueur scientifique et sa disponibilité qui m'ont été d'une grande aide, *Christèle Icard-Vernière* pour sa participation à la réussite de ma thèse et *Dr. Yann Madodé* pour son investissement dans mes travaux.

Je remercie également *Nawel Achir*, *Christian Mestres* et *Erica Siguemoto* pour leur implication et l'initiation aux travaux sur la modélisation. Votre participation a apporté un plus à mes travaux.

Un grand merci aux experts scientifiques de l'IRD et de la FSA qui ont révisé les différents protocoles d'enquête de Cotonou et des zones avant leur soumission au comité d'éthique : *Edwige Landais*, *Eric Verger* et *Amoussa-Hounkpatin Waliou*.

Aux *membres de mes comités de thèse* de l'Université d'Abomey-Calavi et de l'Université de Montpellier, je dis un grand merci pour leurs divers apports dans le cadre de la réalisation de ces travaux.

Toute ma reconnaissance va à l'endroit des stagiaires *Chloé R.*, *Noriane C.*, *Kassim T.*, *Solène D.* et *Lucie C.* qui ont activement participé à la réussite de cette thèse. Sans vous, le boulot m'aurait été encore plus dur à réaliser.

A tous les *enquêteurs* qui ont contribué à la réalisation des études de terrain et à *Claudia Kpossilandé*, je dis un grand merci. Je tiens également à remercier tous les *enquêtés* et les *productrices* des plats traditionnels de niébé pour leur consentement à la participation à cette étude. Je n'oublierai pas aussi les membres du personnel de la *représentation de l'IRD au Bénin* pour leur implication dans la mise en œuvre des démarches administratives et financières au cours des enquêtes.

Je voudrais remercier *Sonia Fortin* pour son assistance dans le cadre de l'analyse des données.

Merci à *Christian Picq* qui s'est toujours rendu disponible pour m'aider dans certaines analyses biochimiques. Je me souviendrai de notre binôme d'enfer lors des dosages des fibres qui étaient si longs.

Je remercie *Isabelle Rochette* pour son aide dans le cadre des analyses chromatographiques, le suivi et la commande des consommables de laboratoires que j'ai utilisés durant ma thèse et pour tout l'intérêt porté sur mes travaux de recherche. Merci pour les matinées de samedi que tu as sacrifiées afin de terminer les dosages de sucres.

Merci à toi *Morgane C.* pour ton assistance lors de mes manipulations au niveau de la chaîne UPLC et pour ta sympathie. Tu gères !

Je n'oublierai également pas *Clara L.* pour sa motivation et ses précieux coups de mains dans le cadre de mes travaux au labo.

Je remercie *Catherine Philibert* et *Christine Ponchaux* pour leur assistance administrative au cours de ces trois années.

Merci au personnel de la maison de technologie et de la halle de l'UMR Qualisud du Cirad en particulier *Julien RICCI*, *Jean-Paul Danflous*, *Antoine Delpeche*, *Charlotte Delpeche*, *Brigitte PONS* et *Joël Grabulos* pour toutes les fois que je les ai sollicités dans le cadre de mes travaux.

Je tiens à dire un grand merci à toute l'équipe du laboratoire des sciences de aliments de l'Université d'Abomey-Calavi, plus particulièrement *Christin S.*, *Racilia G.*, et *Virginie D.* qui ont activement participé à la réussite des travaux sur le terrain depuis le démarrage du projet.

Merci à tous mes collègues doctorants de l'équipe : *Dorgelès D.* (*Dodo*, merci pour ta positivité, ta spontanéité à venir en aide et tes conseils), *Stéphanie Z.* (*Steph*, merci pour les petits cadeaux, les croissants du matin et nos intéressantes discussions sur les travaux de la littérature « les grands esprits »), *Nelly F.* (merci à *Morgane* et toi pour vos sollicitations à faire des rencontres ensemble en dehors du labo. J'espère qu'on refera un autre plan “Mafé entre amis” prochainement), *Henok D.* (Mr Ashagrie, thanks for your support and the moments shared in the lab), *Mbeugué T.* (Dieureudieuf, j'espère qu'on se reverra pour refaire un bon plat de Thiep).

Aux anciens doctorants de l'équipe : *Fabrice B.*, *Marie-Carmen P.*, *Diane D.*, *Laura A.* et *Justine B.* (*ma Juju*, merci pour les petits gâteaux aussi) je vous dis également merci. J'ai pris en compte vos divers conseils pour mieux passer ces trois années.

Je sais gré au professeur *Victor Anihouvi*, *Nadezda Khodorova* et au Dr *Christian Mestres* qui ont respectivement été mes encadrants de stage de licence, du Master 1 et du Master 2 pour m'avoir initié à la recherche.

Chère *Colombe H-D.*, tu fais partie de mes plus belles rencontres ici à Montpellier. Merci pour tes appels quotidiens, nos discussions qui tournent toujours autour de la cuisine et pour toutes

les fois que tu t'es inquiété de n'avoir pas eu de mes nouvelles. C'est pour cela que je t'appelle affectueusement « dada » parce que d'une relation amicale est né un lien familial. Je n'oublierai pas *Nico*, mon grand-frère par alliance, pour sa gentillesse et ses interventions hilarantes au cours de nos discussions. Ainsi s'achève le chapitre « Thèse wê à ! » et un nouveau va s'entamer.

Sèna S., merci pour ta bienveillance chaque fois que je t'ai sollicitée et pour les repas partagés ensemble.

Je remercie Lucie C., Jeannette et Alice pour les petits déjeuners copieux du jeudi et pour ces partages réconfortants qui m'ont beaucoup aidée dans cette dernière phase de ma thèse.

A mes amis de longues dates (*Jocelyne D., Eli, Ruth, Belvida H., Adam M., Fadel A., Martial A., Didier, Christèle K., Antonin, Adèle C. et les camarades de la FSA*), à *tonton Mathieu*, aux familles *KIKI et MESTRES* et à toutes les personnes que je n'ai pas pu citer, j'adresse mes remerciements pour leurs messages et appels pour prendre de mes nouvelles depuis mon arrivée en France.

Merci à toi Maxime pour ton amour, ta patience et ta compréhension.

Je remercie du fond de mon cœur *tonton Marcellin, tata Marie-Ange ainsi que mes cousins*, pour avoir été ma seconde famille ici en France.

A ma famille ! Quelle chance de vous avoir à mes côtés ! Les mots ne suffiront pas pour vous exprimer toute ma gratitude pour votre appui indéfectible. *Papa*, merci pour tes conseils et ta présence. Tu es d'un grand soutien pour moi et te savoir là, me pousse davantage à donner le meilleur de moi. Merci à toi aussi *Maman Abi (Yâo mi)* pour cet amour envers ma personne, les petits soins lors de mes séjours au Bénin et pour les délicieux plats qui me manquent tellement quand je reviens à Montpellier. A mes sœurs, *Yolande et Aurélia*, je dis un grand merci. Oui, je sais, j'ai toujours été très absente mais vos messages et appels réguliers ont permis de plus souder nos liens. A mes petits frères (*Abiel, Yanel et Darel*), je vous promets d'être plus disponible maintenant pour passer de bons moments ensemble et il n'y aura plus des promesses non tenues. Je vous aime tous !

Enfin, je voudrais dire un grand merci au *jury de thèse* pour avoir accepté de participer à l'appréciation de ce travail.

Valorisations des résultats

Les résultats de cette thèse ont fait l'objet de différentes valorisations scientifiques (publications et communications orales et affichées) :

Articles scientifiques

- **Publication 1** : Consumption of cowpea-based dishes in Benin: main motives and barriers, and spatial and temporal changes (article soumis)
- **Publication 2** : Current consumption of traditional cowpea dishes in South Benin contributes to at least 30% of recommended intakes for dietary fibre, folate and magnesium (en préparation pour soumission)
- **Publication 3** : Akissoé, L., Madodé, Y.E., Hemery, Y.M., Donadjè, B.V., Icard-Vernière, C., Hounhouigan, D.J. & Mouquet-Rivier, C. (2021). Impact of traditional processing on proximate composition, folate, mineral, phytate, and alpha-galacto-oligosaccharide contents of two West African cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) based doughnuts. *Journal of Food Composition and Analysis*, 96, 103753. [10.1016/j.jfca.2020.103753](https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103753)
- **Article de colloque** : Akissoé F.L., Hemery M.Y., Icard-Verniere C., Madode Y., Roger A., Hounhouigan D.J., Mouquet-Rivier C., 2019. Fréquence et formes de consommation du niébé en milieu urbain au Bénin et freins potentiels à cette consommation. *Innovations Agronomiques* 74, 176-182. dx.doi.org/10.15454/nqgiap

Communications orales

- Akissoé FL, Hemery MY, Icard-Vernière C, Madodé Y, Roger A, Hounhouigan DJ, Mouquet-Rivier C, 2018. Fréquence et formes de consommation du niébé en milieu urbain au Bénin et freins potentiels à cette consommation. Rencontres Francophones sur les légumineuses RFL2, 17-18 octobre, Toulouse, France.
- Akissoé L. et al. (2020). Traditional cowpea-based food consumption in Benin: a significant contribution to adult nutritional requirements. 4th International Conference on Global Food Security, Online Edition, Montpellier, France
- Akissoé et al. (2021). Consommation du niébé au Bénin : perceptions et freins à la consommation. Rencontres Francophones sur les légumineuses RFL3, Edition en ligne, Anger, France.

Communications affichées

- Akissoé FL, Madodé Y, Donadjé V, Icard-Vernière C, Hemery M, Briffaz A, Hounhouigan DJ, Mouquet-Rivier C, 2018. La sévérité des procédés de transformation compromet-elle l'intérêt nutritionnel du niébé dans les plats traditionnels Ouest-Africains ? Poster présenté aux Rencontres Francophones sur les légumineuses RFL2, 17-18 octobre, Toulouse, France

Evènement :

- Contribution à l'organisation de la « journée du niébé » à Cotonou le 4 décembre 2019, journée organisée à l'initiative de l'ensemble des partenaires du projet Icowpea (notamment les UMRs Qualisud et Innovation du Cirad, et la Faculté de Sciences Agronomiques de l'Université d'Abomey calavi). Elaboration de trois posters de vulgarisation à l'attention des productrices pour cette manifestation).

Table des matières

Résumé	ii
Abstract	iv
Dédicace	vi
Remerciements	vii
Valorisations des résultats	x
Table des matières	xii
Liste des tableaux	xv
Liste des figures.....	xviii
Abréviations	xx
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Etat de l'art	7
1.1. Les légumineuses : types de graines, composition et intérêt nutritionnels	8
1.2. Le niébé, légumineuse emblématique d'Afrique de l'ouest	13
1.2.1. Origine, caractéristiques morphologiques et culture	13
1.2.2. Production des légumineuses et distribution du niébé en Afrique de l'Ouest	15
1.2.3. Pratiques de consommation du niébé en Afrique de l'Ouest et au Bénin.....	17
1.2.3.1. Aliments traditionnels à base de niébé	17
1.2.3.2. Stockage du niébé : Impact sur les graines et les aliments dérivés	20
1.2.4. Procédés de transformation du niébé récurrents en Afrique de l'Ouest.....	20
1.2.4.1. Trempage.....	21
1.2.4.2. Cuisson à l'eau.....	22
1.2.4.3. Friture	23
1.3. Micronutriments et composés bioactifs du niébé : folates, thiamine, minéraux, alpha-galactosides et fibres, phytates.....	26
1.3.1. Folates	26
1.3.1.1. Origine et historique.....	26
1.3.1.2. Structure et distribution dans les légumineuses.....	26
1.3.1.3. Absorption, métabolisme et rôle des folates	28
1.3.1.4. Prévalence de la carence en folates	29
1.3.1.5. Les aliments sources de folates.....	29
1.3.1.6. Méthodes de détermination des folates dans les aliments	29
1.3.1.7. Influence des procédés de transformation sur les folates	30
1.3.2. Thiamine	33
1.3.2.1. Structure chimique et distribution dans les graines de légumineuses	33
1.3.2.2. Absorption, métabolisme et rôle physiologique de la thiamine	34

1.3.2.3.	Manifestation de la carence et importance dans le monde	36
1.3.2.4.	Les aliments sources de thiamine	37
1.3.2.5.	Influence des procédés de transformation	38
1.3.3.	Minéraux	41
1.3.3.1.	Absorption, rôle physiologique, manifestation de la carence	41
1.3.3.2.	Influence des procédés de transformation sur les teneurs en minéraux	45
1.3.4.	Alpha-galactosides et fibres	45
1.3.4.1.	Structure des alpha-galactosides et biosynthèse.....	45
1.3.4.2.	Influence des procédés de transformation sur les alpha-galactosides	47
1.3.5.	Phytates.....	48
1.3.5.1.	Structure et rôle physiologique.....	48
1.3.5.2.	Facteurs influençant les teneurs en phytates au cours de la transformation	49
1.4.	Etude des mécanismes se produisant au cours des procédés de transformation.....	49
1.4.1.	Quelques mécanismes des procédés de transformation.....	49
1.4.2.	Etude de quelques mécanismes via la modélisation.....	50
1.5.	Consommation alimentaire et situation nutritionnelle actuelle de la population adulte en Afrique de l'ouest et au Bénin.....	52
1.6.	Apports journaliers recommandés en folates, thiamine, minéraux chez les adultes	57
1.7.	Evaluation de l'apport alimentaire et nutritionnel des populations.....	59
1.7.1.	Méthodes d'évaluation de la consommation alimentaire	59
1.7.2.	Outils de mesure de la consommation alimentaire et de l'apport nutritionnel	61
1.8.	Conclusion : Quelle est l'importance du niébé dans l'alimentation au Bénin et sur quels leviers jouer en vue de tirer pleinement profit des bénéfices de cette légumineuse ?.....	62
Chapitre 2 : Matériel et Méthodes.....		64
2.1.	Matériel Végétal	65
2.2.	Protocole d'étude	65
2.2.1.	Enquête de consommation alimentaire	65
2.2.1.1.	Choix des zones d'études	66
2.2.1.2.	Échantillonnage de la population enquêtée	67
2.2.1.3.	Elaboration du catalogue photo des neuf plats traditionnels pour l'estimation des tailles de portions	68
2.2.1.4.	Groupes de discussion focalisée.....	68
2.2.1.5.	Considérations éthiques.....	69
2.2.2.	Échantillonnage des plats traditionnels de niébé	69
2.2.3.	Suivis de production des beignets de niébé et échantillonnage.....	71
2.2.3.1.	Echantillonnage des produits intermédiaires et finaux au cours de la production du ragout et de Beignets de niébé	71

2.2.3.2. Réalisation de bilan matière au cours de la production des beignets Ata	71
2.2.4. Production des beignets de niébé en conditions contrôlées	73
2.2.4.1. Préparation des gritz de niébé et cinétique de trempage des gritz pour la préparation des beignets Ata	73
2.2.4.2. Fabrication des beignets de Ata et Ata-doco	74
2.3. Méthodes d'analyses de laboratoire.....	79
2.3.1. Préparation des échantillons avant analyses de composition nutritionnelle	79
2.3.2. Composition globale	80
2.3.3. Dosage des minéraux	81
2.3.4. Dosage des folates (vitamine B9)	81
2.3.5. Dosage de la thiamine (vitamine B1)	83
2.3.6. Dosage des alpha-galactosides.....	84
2.3.7. Dosage des phytates.....	85
2.3.8. Mesure de couleur	85
2.3.9. Mesure de granulométrie	85
2.4. Modélisation des phénomènes de diffusion au cours du trempage des gritz de niébé	86
2.5. Traitements des données	86
2.5.1. Analyse des données d'enquête	86
2.5.1.1. Calculs préliminaires.....	86
2.5.1.2. Tests statistiques	89
2.5.2. Analyse des données de laboratoire	90
2.5.2.1. Analyse du plan d'expérience friture	90
2.5.2.2. Autres analyses statistiques	90
Chapitre 3 : Résultats	91
3.1. Motivations et freins à la consommation du niébé	92
3.1.1. Publication 1: Consumption of cowpea-based dishes in Benin: main motives and barriers, and spatial and temporal changes	93
3.1.2. Synthèse et perspective	114
3.2. Contribution nutritionnelle des plats traditionnels de niébé.....	115
3.2.1. Publication 2: Current consumption of traditional cowpea dishes in South Benin contributes to at least 30% of recommended intakes for dietary fibre, folate and magnesium....	115
3.2.2. Synthèse et perspective	138
3.3. Impact des procédés traditionnels de fabrication des beignets sur la qualité nutritionnelle	139
3.3.1. Publication 3: Impact of traditional processing on proximate composition, folate, mineral, phytate, and alpha-galacto-oligosaccharide contents of two West African cowpea (<i>Vigna unguiculata L. Walp</i>) based doughnuts.....	140
3.3.2. Synthèse et perspective	168

3.4. Etude du comportement de la thiamine et des alpha-galactosides au cours du trempage des grits de niébé : Modélisation des phénomènes diffusifs	169
3.5. Réduction de l'absorption d'huile durant de la friture des beignets de niébé « Ata » et « Ata-doco » et devenir de la thiamine au cours de cette étape	199
Chapitre 4 : Discussion générale	225
4.1. Détermination de la composition nutritionnelle des plats traditionnels de niébé.....	227
4.2. Détermination des fréquences de consommation et quantités consommées des plats de niébé	
228	
4.3. Estimation de la contribution nutritionnelle des plats de niébé aux apports journaliers recommandés.....	230
4.4. Participation des plats de niébé à la sécurité alimentaire	231
4.5. Identification des déterminants de la consommation du niébé à Cotonou et dans les zones rurales : motivations et freins à la consommation du niébé	232
4.6. Mise en évidence des étapes de transformation des beignets de niébé influençant la qualité nutritionnelle des beignets Ata et Ata-doco	234
4.7. Compréhension des mécanismes impactant les composés d'intérêt au cours du trempage et recommandations de trempage.....	238
4.8. Identification de conditions optimales au cours de la friture des beignets.....	240
4.9. Bénéfices nutritionnels potentiels suite à l'étude des étapes de trempage et de friture, et réponses aux attentes des consommateurs	241
Conclusion générale	244
Perspectives.....	246
Références bibliographiques	250
Annexes	263
Annexe 1 : Questionnaire de l'enquête de fréquence de consommation alimentaire	264
Annexe 2 : Guide d'entretien des discussions de groupe	271
Annexe 3 : Avis du comité national d'éthique pour la recherche en santé du Bénin (CNERS)	273
Annexe 4 : Supplementary material publication1.....	275
Annexe 5 : Supplementary material publication 2.....	265
Annexe 6: Supplementary material publication 3.....	276

Liste des tableaux

Chapitre 1 :

Tab 1. 1 : Composition globale, en micronutriments et en facteurs antinutritionnels de quelques légumineuses fréquemment consommées au Bénin (100 g base sèche)	10
Tab 1. 2 : Intérêt des légumineuses sur la santé	11
Tab 1. 3 : Production des légumineuses (en tonnes) au Bénin	15

Tab 1. 4 : Aliments à base de niébé consommés en Afrique de l'Ouest	17
Tab 1. 5 : Quantités de graines de niébé consommées en Afrique de l'ouest entre 1990-1999	19
Tab 1. 6 : Vitamères de folates et position de leur radical mono-carboné.....	27
Tab 1. 7 : Techniques de dosage des folates dans les aliments	30
Tab 1. 8 : Distribution de la thiamine dans le haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	34
Tab 1. 9 : Teneurs en thiamine de quelques aliments consommés en Afrique sub-saharienne	38
Tab 1. 10 Apports journaliers recommandés pour les adultes	58
Tab 1. 11 : Quelques objectifs d'évaluation de la consommation alimentaire.....	60

Chapitre 2 :

Tab 2. 1 : Récapitulatif des lots de graines de niébé utilisés par type d'activité	65
Tab 2. 2 : Plan d'échantillonnage à deux degrés des enquêtés aux FFQs	67
Tab 2. 3 : Liste des plats traditionnels de niébé auprès des productrices	70
Tab 2. 4 : Facteurs et niveaux d'optimisation de l'étape de friture des beignets Ata et Ata-doco	75
Tab 2. 5 : Plan d'expérience de friture des beignets Ata et Ata-doco.....	78

Chapitre 3 :

Tab 3. 1 : Percentages of respondents consuming cowpea and other locally available legumes during the week before the FFQ survey in Cotonou and the rural areas of Adjohoun and Allada (% respondents)	99
Tab 3. 2 : Reasons for non-consumption of cowpea-based dishes during the FFQ week	101
Tab 3. 3 : Participants' perceived opinions on cowpea consumption in the FFQs.....	103
Tab 3. 4 : Focus group topics and keyword generated from the discussions	105
Tab 3. 5 : Socio-economics status and characteristics of the participants	127
Tab 3. 6 : Percentages of people consuming cowpea and frequency of consumption in Cotonou and surveyed rural areas.....	128
Tab 3. 7 : Quantities of cowpea dishes consumed (g, fresh weight) and cowpea seeds (g, fresh weight) in Cotonou and the rural study areas.....	130
Tab 3. 8 : Nutritional composition of cowpea dishes (per 100g of edible portion)	132
Tab 3. 9 : Proximate composition of the cowpea seeds and doughnuts (ata and ata-doco) according to different processes.....	153
Tab 3. 10 : Changes in mineral, phytate and folate contents (on a dry matter basis) during ata and ata-doco processing.	157
Tab 3. 11 : Dry matter, total folate and alpha-galactoside content in the different fractions during ata processing.....	164
Tab 3. 12 : Unités des paramètres.....	176
Tab 3. 13 : Distribution du nombre de mole initial de la thiamine totale dans les gritz trempés et dans l'eau de trempage (%)	185
Tab 3. 14 : Coefficients de diffusion (Deff) et concentration à l'équilibre (Ce) des alpha-galactosides et du galactose.....	189
Tab 3. 15 : Coefficients de diffusion (D _{eff}) et concentration à l'équilibre (C _e) de la thiamine totale ..	190
Tab 3. 16 : Différents essais du plan d'expérience Ata et Ata-doco	202
Tab 3. 17 : Taille des particules caractéristiques des différents échantillons.....	206
Tab 3. 18 : Teneur en eau des pâtes de AT et AD.....	207
Tab 3. 19 : Masses et dimensions des beignets, de la mie et de la croute	213

Tab 3. 20 : Teneurs moyennes en vitamine B1 ($\mu\text{g/g}$ base humide) des pâtes de AT et AD	214
Tab 3. 21 : Répartition de la teneur en matière sèche, des lipides et de la thiamine dans les beignets et au niveau de ces différents compartiments	216
Tab 3. 22 : Effets des facteurs du plan d'expérience friture sur les teneurs en thiamine monophosphate, thiamine diphosphate et thiamine libre des beignets Ata et Ata-doco : p-values indiquant le niveau de significativité des facteurs.....	219

Chapitre 4 :

Tab 4. 1 : Composition nutritionnelle par groupe de plats à base de niébé	227
---------------------------------------------------------------------------------	-----

Liste des figures

Chapitre 1 : Etat de l'art

Fig 1. 1 : Aptitude climatique de la culture du niébé au Bénin (à cycle court).....	14
Fig 1. 2 : Production annuelle du niébé (graines sèches) en Afrique de l'Ouest et dans les trois premiers pays producteurs de la sous-région	16
Fig 1. 3 : Distribution du niébé entre les pays de l'Afrique de l'ouest	16
Fig 1. 4 : Morphologie de la graine de niébé et microstructure.....	22
Fig 1. 5 : Schéma du transfert simultané de chaleur et de matière pendant la friture.....	24
Fig 1. 6 : Structure du folate	27
Fig 1. 7 : Thiamine et les formes phosphatées (TMP : Thiamine monophosphate, TDP : Thiamine diphosphate, TTP : Thiamine triphosphate).....	33
Fig 1. 8 : Sections transversales et longitudinales de la graine de <i>Phaseolus vulgaris L.</i>	34
Fig 1. 9 : Cycle de la thiamine et de ses formes dans l'organisme	35
Fig 1. 10 : Disponibilité en thiamine dans le monde	37
Fig 1. 11 : Synthèse des facteurs influençant la stabilité de la thiamine	39
Fig 1. 12 : Schéma d'ionisation et de dégradation de la thiamine	40
Fig 1. 13 : Structures des alpha-galactosides	46
Fig 1. 14 : Structure du myo-inositol 1,2,3,4,5,6 Hexakis Dihydrogen phosphate	48
Fig 1. 15 : Comparaison entre consommation alimentaire aux niveaux national, sous régional, régional et mondial (Global nutrition report, 2020) avec les valeurs de références fixées par (Willett et al., 2019).	53
Fig 1. 16 : Prévalence de certaines maladies liées à l'alimentation en Afrique sub-saharienne et au Bénin chez les adultes.	56

Chapitre 2 : Matériel et méthodes

Fig 2. 1 : Localisation géographique des zones étudiées.....	66
Fig 2. 2 : Diagramme de production des beignets Ata avec identification des étapes de prélèvement au cours du bilan matière.....	72
Fig 2. 3 : Moulin à meules et obtention des gritz de niébé	74
Fig 2. 4 : Dispositif de friture des beignets Ata et Ata-doco.....	77
Fig 2. 5 : Procédure d'échantillonnage des beignets préparés en laboratoire pour analyse de composition.....	79
Fig 2. 6 : Schéma de pondération de participants aux enquêtes FFQs	87
Fig 2. 7 : Etapes de création des classes socio-économiques	88

Chapitre 3 : Résultats

Fig 3. 1 : Evolution over time in the consumption of cowpea based dishes in Cotonou and rural areas	112
Fig 3. 2 : Scheme of the survey design	120
Fig 3. 3 : Sum daily contribution of the cowpea dishes to the RNI, during the FFQ week before, among cowpea consumers*.....	133
Fig 3. 4 : Diagram showing the different steps of cowpea seed processing into ata and ata-doco....	145

Fig 3. 5 : Raffinose, stachyose and verbascose content (on a dry matter basis) during Ata and Ata-doco) processing.....	161
Fig 3. 6 : Dry matter, folate and alpha-galactoside distribution in the different production fractions during the traditional processing of Ata	163
Fig 3. 7 : Schéma hypothétique de réaction-diffusion des vitamères de thiamine et des alpha-galactosides au cours du trempage.....	171
Fig 3. 8 : Gritz lavés de niébé	173
Fig 3. 9 : Capacité d'absorption d'eau par les gritz au cours du trempage	178
Fig 3. 10 : Données expérimentales des alpha-galactosides et du galactose dans l'eau de trempage	180
Fig 3. 11 : Données expérimentales des alpha-galactosides et du galactose dans les gritz trempés .	181
Fig 3. 12 : Données expérimentales de la Thiamine disphosphate (TDP), Thiamine monophosphate (TMP) et de la thiamine dans l'eau de trempage	182
Fig 3. 13 : Données expérimentales de la TDP, TMP et de la thiamine dans les gritz trempés	183
Fig 3. 14 : Nombre de moles des vitamères de la thiamine, des alpha-galactosides, du galactose dans les gritz et dans l'eau après 1h de trempage.	186
Fig 3. 15 : Représentation graphique des données expérimentales (points) vs prédites (lignes) de l'évolution des teneurs en thiamine totale et alpha-galactosides totaux dans l'eau de trempage, en fonction de la durée et de la température de trempage.	188
Fig 3. 16 : Courbes d'Arrhenius de l'effet de la température de trempage sur la diffusivité effective (D_{eff}) de la thiamine totale et des alpha-galactosides totaux. T : Température	192
Fig 3. 17 : Courbes de diffusion de la thiamine totale et des alpha-galactosides (%), construites à partir des données prédites, pour des durées de trempages plus longues.....	193
Fig 3. 18 : Distribution granulométrique des particules de pâtes AT et AD pour les deux réglages de broyage.....	206
Fig 3. 19 : Aspect des pâtes des beignets AD après 15 min de battage en fonction de leur granulométrie	207
Fig 3. 20 : Evolution de la température dans le bain d'huile et au cœur des beignets AT.....	209
Fig 3. 21 : Evolution de la température dans le bain d'huile et au cœur des beignets AD	210
Fig 3. 22 : Effet des facteurs étudiés sur la couleur de la croute des beignets AT et AD	212
Fig 3. 23 : Photos des beignets Ata (AT) et Ata-doco (AD)	212
Fig 3. 24 : Effet des facteurs étudiés sur la proportion de croute formée après friture	213
Fig 3. 25 : Effet des facteurs du plan d'expérience friture sur la teneur en lipides (base humide) dans la mie, la croute et les beignets	218
Fig 3. 26 : Effet des facteurs étudiés sur la teneur en thiamine totale (base humide) dans la mie, la croute et les beignets	220

Chapitre 4 : Discussion générale

Fig 4. 1 : Apport en énergie (kcal) et en protéines (g) des plats à base de niébé au cours de la semaine précédent l'enquête FFQ.....	232
Fig 4. 2 : Quantités d'alpha-galactosides consommées par portion moyenne consommée pour chaque plat de niébé.....	234
Fig 4. 3 : Photos des étapes de production des beignets Ata	235
Fig 4. 4: Test en laboratoire sur l'effet de la vitesse de battage sur la teneur en folates.....	237
Fig 4. 5 : Mécanismes susceptibles d'influencer les teneurs en alpha-galactosides et en thiamine au cours du trempage des gritz de niébé	239
Fig 4. 6 : Qualités recherchées par les consommateurs pour les beignets Ata et Ata-doco.....	242

Abréviations

TMP : Thiamine monophosphate

TDP : Thiamine diphosphate

TPP : Thiamine triphosphate

Fe : Fer

Zn : Zinc

Ca : Calcium

Mg : Magnésium

K : Potassium

IP6 : Inositol hexaphosphate

AT : Ata

AD : Ata-doco

FFQ : Food Frequency Questionnaire

AJR : Apports Journaliers Recommandés

RNI : Recommended Nutrient intake

ANOVA : Analyse de variance

CAH : Classification ascendante hiérarchique

SCE : Somme des carrées de écarts

UPLC : Ultra Performance Liquid Chromatography

BH : Base humide

MS : Masse sèche

Introduction générale

Introduction générale

La consommation d'aliments d'origine végétale comme les légumineuses est recommandée pour assurer une alimentation saine et durable, c'est-à-dire concilier équilibre nutritionnel, réduction des impacts environnementaux, acceptabilité culturelle et accessibilité financière (Willett *et al.*, 2019). Environ 87 % des pays (approximativement 100 au total y compris le Bénin) ayant développé des guides alimentaires sous l'assistance de l'Organisation Mondiale de l'Alimentation et de l'Agriculture (FAO) recommandent l'inclusion des légumineuses dans le régime alimentaire (Rawal and Navarro, 2019).

Le rôle important joué par les légumineuses dans les systèmes agricoles et dans les régimes alimentaires des populations à revenu faible et intermédiaire, fait de ces cultures, des aliments ressources pour atteindre les objectifs de développement durable (ODD 1, 3, 15) visant à réduire la pauvreté, à améliorer la santé et la nutrition humaines et à renforcer la résilience des écosystèmes (Akibode and Maredia, 2011).

Du point de vue environnemental, la culture des légumineuses contribue à la restauration de l'azote dans le sol sans ajout d'engrais (Schneider and Huyghe, 2015) et à réduire la production des gaz à effet de serre du fait de la substitution des protéines animales par les protéines végétales apportées par les graines de légumineuses.

Sur le plan nutritionnel, les légumineuses – au sens de légumes secs, à l'exclusion de l'arachide et du soja – constituent pour la plupart des populations des pays du sud, la principale source de protéines. Elles fournissent également de l'énergie, des fibres alimentaires, des minéraux et des vitamines nécessaires à la santé humaine (Boye *et al.*, 2010). De nombreuses études suggèrent le rôle bénéfique des légumineuses (en raison de leur teneur élevée en fibres) dans la prévention du diabète, de l'hypertension et des maladies chroniques liées à l'alimentation (Wilson, 2013; Arnoldi *et al.*, 2015; Maposa and Jideani, 2017). Cependant, les légumineuses contiennent également des facteurs antinutritionnels pouvant occasionner un inconfort digestif pour le consommateur (alpha-galactosides), ou limiter la biodisponibilité de certains micronutriments (composés chélateurs de minéraux). Plusieurs méthodes traditionnelles de transformation incluant des opérations unitaires telles que le décorticage, la mouture, le trempage, la cuisson à l'eau, la fermentation, la germination, la friture et la cuisson à vapeur sont appliquées pour réduire voire éliminer ces composés (Uzogara and Ofuya, 1992). Néanmoins, ces procédés, s'ils sont très drastiques (par exemple un fractionnement poussé

et une friture pour la préparation du Ata, un beignet fréquemment consommé en restauration hors domicile) pourraient entraîner une réduction de la valeur nutritionnelle des plats.

Par ailleurs, le déclin de la consommation de légumineuses au profit des aliments d'origine animale est un phénomène qui est de plus en plus observé à l'échelle mondiale (Rawal and Navarro, 2019). L'urbanisation et l'augmentation des revenus s'accompagnent en effet d'une transition alimentaire et sont généralement désignées comme étant les causes de cette situation. L'Afrique sub-saharienne est la région du monde où la consommation de légumineuses par habitant est la plus élevée (Akibode and Maredia, 2011), mais des études récentes indiquent une consommation généralement plus faible en ville que dans les zones rurales (Bricas *et al.*, 2016).

Les carences en micronutriments, particulièrement en fer, zinc et folates, sont reconnues comme des problèmes de santé publique auxquels il est urgent de remédier. Soutenir la consommation des légumineuses par les populations urbaines pourrait y contribuer, tout en jouant un rôle de prévention des maladies chroniques liées à l'alimentation, dont les prévalences augmentent de manière préoccupante dans les villes africaines.

Parmi les légumineuses, le niébé (*Vigna unguiculata*) est la plus largement cultivée en Afrique de l'ouest (Rawal and Navarro, 2019). Tous les éléments précédemment énumérés amènent à formuler deux hypothèses : i) du fait de la transition nutritionnelle en cours dans les zones urbaines et qui gagnent aussi les zones rurales du Bénin, la consommation de légumineuses (et plus particulièrement du niébé) pourrait diminuer et donc impacter négativement les ingérés des populations en micronutriments (minéraux, vitamines B1 et B9) et en composés bioactifs d'intérêt (fibres), et/ou ii) l'adaptation des procédés de transformation du niébé au mode de vie urbain s'accompagnerait d'un appauvrissement des produits sur le plan nutritionnel, en particulier d'une diminution de leurs teneurs en micronutriments.

Les campagnes de sensibilisation sur les avantages nutritionnels des légumineuses et la nécessité de leur introduction ou conservation dans le régime alimentaire des populations ont connu ces dernières années un vif regain d'intérêt. Ainsi, de nombreux projets ou travaux de recherche visant à améliorer les connaissances dans le domaine agricole et de la transformation alimentaire ont vu le jour. Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse s'inscrivent dans le cadre des activités de deux projets collaboratifs entre le Bénin (FSA-UAC) et la France (UMR Qualisud-Cirad-IRD) :

- Le projet ICOWPEA (2017-2021), financé par les fondations Agropolis/Cariplo/Carasso et porté par l'UMR Qualisud-Cirad, visait à promouvoir la consommation de plats à base de niébé à forte valeur nutritionnelle en milieu urbain au Bénin, en proposant, de manière participative via la mise en place d'une plateforme d'innovation multi-acteurs, des solutions technologiques adaptées.
- Le projet TransnutNiébé (2018-2021), financé par l'Université de Montpellier à travers l'I-site Muse et porté par l'équipe Alimentation, Nutrition, Santé de l'UMR QualiSud, dont l'objectif est la prévention des carences en micronutriments dans les pays du sud dans un contexte de transition alimentaire à travers l'incitation à la consommation des aliments traditionnels de niébé hautement nutritionnels.

Les principales activités réalisées dans le cadre de cette thèse se répartissent en deux volets que sont l'étude de la consommation des aliments à base de niébé par la population dans trois zones au sud du Bénin, et l'étude de l'influence des procédés de transformation traditionnels du niébé sur leur valeur nutritionnelle. Plus spécifiquement les travaux suivants ont été réalisés :

- Enquête sur la consommation du niébé par les populations adultes de Cotonou et de deux communes rurales du sud du Bénin ;
- Caractérisation de la valeur nutritionnelle des principaux plats à base de niébé en vue d'évaluer leur contribution à la couverture des besoins nutritionnels des populations enquêtées ;
- Evaluation de l'évolution de la consommation du niébé dans le temps et dans l'espace ;
- Compréhension des mécanismes responsables des pertes en micronutriments ou composés bioactifs au cours de certains procédés traditionnels.

Après cette **introduction générale**, le présent manuscrit de thèse a été structuré en 4 chapitres. Ce manuscrit de thèse s'achève par une conclusion générale, la proposition de futurs travaux et les références bibliographiques.

Dans la **Revue de la littérature (chapitre 1)**, l'étude des travaux réalisés sur le niébé en lien avec nos objectifs de recherche a été effectuée. Les points explorés sont relatifs à l'importance des légumineuses dans le système alimentaire et pour la santé humaine, la production ainsi que la consommation du niébé en Afrique de l'ouest, les procédés traditionnels de fabrication des plats de niébé, la description de quelques nutriments d'intérêts et composés bioactifs des graines de niébé, l'influence des procédés traditionnels sur la valeur nutritionnelle des plats de niébé incluant les mécanismes impactant la qualité nutritionnelle des aliments, la situation nutritionnelle actuelle de la population béninoise et les méthodes d'évaluation de la consommation alimentaire.

Le Chapitre 2 présente les Matériels et méthodes mis en œuvre. Une description de la méthodologie expérimentale a été faite. Il s'agit des méthodes d'enquête, de méthodes d'analyse de composition des aliments en laboratoire et les essais de procédés traditionnels en conditions contrôlées. Les méthodes d'analyses statistiques des données sont également décrites.

Les Résultats, réunis dans le chapitre 3, s'articulent en plusieurs sous-chapitres rédigés sous la forme d'articles scientifiques, ce chapitre montre l'ensemble des contributions de cette thèse. (i) Tout d'abord, nous avons présenté les résultats des enquêtes de consommation des plats de niébé qui, associés à la caractérisation de la valeur nutritionnelle des principaux plats à base de niébé, ont permis de déterminer leur contribution nutritionnelle aux apports journaliers recommandés (projet d'article 1 en cours de finalisation). (ii) Les résultats des enquêtes ont également permis d'identifier les freins et motivations à la consommation du niébé (projet d'article 2 en cours de finalisation). (iii) Ensuite, les données des travaux portant sur l'influence des procédés traditionnels de production des beignets ont été présentées (article 3 publié dans Journal of Food Analysis and Composition). (iv) Enfin, les résultats des études préliminaires sur la compréhension des mécanismes impactant les composés d'intérêt via une approche de modélisation ont été abordés. Ces dernières données feront l'objet d'un 4^{ème} article à rédiger ultérieurement.

Dans le **Chapitre 4 « Discussion générale »**, les résultats des différents chapitres sont discutés ensemble pour une analyse plus approfondie, la comparaison avec d'autres travaux de la littérature et l'interprétation des résultats obtenus ont été faites en vue de tirer des conclusions.

Enfin, le manuscrit se termine par une partie Conclusion et perspectives récapitule les principaux résultats et les recommandations qui en découlent, sur les plans recherche et opérationnels. Et, sur la base des apports scientifiques de cette thèse et des activités non explorées, des perspectives de recherche sont également proposées.

Chapitre 1 : Etat de l'art

1.1. Les légumineuses : types de graines, composition et intérêt nutritionnels

Les légumineuses occupent une place importante dans l'alimentation humaine notamment dans le régime alimentaire des populations des pays en développement (Tharanathan and Mahadevamma, 2003). Les légumineuses dont les graines sont utilisées dans l'alimentation humaine peuvent être classées en trois groupes à savoir les oléagineuses (soja, arachide), les légumes secs (pois chiches, lentilles, haricots, niébé) et les graines vertes immatures (petit pois, haricots verts, fèves) (Mouquet-Rivier and Amiot, 2019). Elles contiennent des quantités importantes de protéines (plus de deux fois plus que les céréales). La teneur en protéines de certaines légumineuses consommées en Afrique sub-saharienne (niébé, pois bambara, arachide, soja, lentille de terre, néré, pois d'angole) peut varier entre 15-41 g/100 g base sèche (Tab 1.1). Il est également reconnu que le profil en acides aminés de la plupart des légumineuses complète celui des céréales (Taiwo, 1998). La composition en fibres représente une des caractéristiques nutritionnelles intéressantes des graines de légumineuses avec des teneurs en fibres totales comprises entre 9-29 g/100 g base sèche (Tab 1.1). Certains composés d'intérêts tels que les minéraux (Ca, Mg, K, Fe, Zn), la thiamine, les folates sont également présents dans les graines de légumineuses, mais on note des différences de composition en fonction des légumineuses (Tab 1.1).

Outre leur composition en nutriments d'intérêt nutritionnel, les légumineuses contiennent des facteurs antinutritionnels ou ayant une activité anti-nutritionnelle. Ces composés dits "bioactifs" comprennent les inhibiteurs de protéase, les inhibiteurs d'amylase, les hémagglutinines, les allergènes, les glycosides cyanogènes, les composés chélateurs de minéraux (phytates, oxalates, saponines, polyphénols) et les facteurs de flatulence (alpha-galactosides) (Uzogara and Ofuya, 1992). Certains de ces composés présentent à la fois des effets négatifs et positifs sur la santé (Thompson, 1993). C'est le cas des alpha-galactosides qui sont des composés entraînant des troubles intestinaux tels que ballonnements et flatulences, mais aussi des prébiotiques favorables à la croissance des "bonnes" bactéries au niveau du côlon. Les polyphénols quant à eux sont des antioxydants, mais peuvent parfois complexer les minéraux.

Le rôle des légumineuses dans la prévention de l'obésité ou des maladies chroniques liées à l'alimentation comme le diabète de type 2 à travers la réduction de l'index glycémique est maintenant largement reconnu (Tab 1.2, d'après Polak et al, 2015). La consommation des

légumineuses favorise également la réduction du taux de cholestérol total permettant ainsi de prévenir l'apparition de certaines maladies coronariennes ou cardiovasculaires. Outre les effets bénéfiques des légumineuses sur la santé humaine, elles possèdent également des avantages sur le plan environnemental, car elles permettent d'obtenir de meilleurs rendements de production au niveau d'autres cultures si elles sont cultivées en association ou en rotation de culture. Au cours de leur développement, elles présentent une meilleure capacité de fixation de l'azote atmosphérique (N₂) pour produire leurs propres composants protéiques. Cette capacité est permise par la symbiose avec des bactéries du sol qui sont fixatrices de l'azote au sein d'organes spécialisés (les nodules) qui se développent sur les racines (Schneider and Huyghe, 2015). Les légumineuses jouent également un rôle dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), car elles libèrent 5 à 7 fois moins de GES par unité de surface que les autres cultures, permettent la séquestration du carbone et induisent une économie d'énergie fossile dans le système grâce à la réduction d'engrais azoté (Stagnari *et al.*, 2017). De plus, les régimes riches en protéines substituant la viande de ruminants par des alternatives comme les légumineuses permettent une réduction des GES (Willett *et al.*, 2019).

Tab 1. 1 : Composition globale, en micronutriments et en facteurs antinutritionnels de quelques légumineuses fréquemment consommées au Bénin (100 g base sèche)

		Niébé (<i>Vigna unguiculata</i>)	Pois Bambara (<i>Vigna subterranea</i>)	Pois d'angole (<i>Cajanus cajan</i>)	Lentille de terre (<i>Kerstingiella geocarpa</i>)	Arachide (<i>Arachis hypogaea</i>)	Soja (<i>Glycine max (L.)</i>)	Néré (<i>Parkia biglobosa</i>)
Macronutriments	Lipide (g)	1,1-2,7 ³	6,1 ¹⁹	1,4-1,7 ^{2,15}	2,1 -2,4 ¹	41,4-52,8 ²	18,7 ¹⁹	21 ²
	Protéine (g)	22 -30 ³	23 ¹⁹	21-23 ^{2,15}	15,6 -18,3 ¹	21,5-27,4 ²	40-41 ¹²	34,7 ²
	Glucide (g)	50-66 ⁴	35 ¹⁹	50-53 ^{2,15}	69 -70 ¹	11-24 ²		35,5 ²
	Fibre (g)	16- 21 ⁴	29 ¹⁹	23 ²		9,1-9,2 ²	19,7-24,4 ¹²	
Micronutriments	Fer (mg)	5,6 – 10,4 ³	5,0 ¹⁹	3,2-4,5 ¹⁴	9,9-13 ¹	2,2-4,2 ^{2,11}	7,8 ¹⁹	5,3-5,7 ¹⁸
	Zinc (mg)	3,7 -4,4 ³	2,6 ¹⁹	2,1-2,4 ¹⁴	4,4 -4,9 ¹	2,6-2,7 ²	5,2 ¹⁹	
	Calcium (mg)	66 – 144 ³	71 ¹⁹	79-170 ¹⁴	16-20 ¹	50-61 ²	256 ¹⁹	143-147 ¹⁸
	Magnésium (mg)	202-223 ⁸	192 ¹⁹	100-142 ¹⁴	22 -32 ¹	200-210 ²	270 ¹⁹	2,9-3,6 ¹⁸
	Potassium	1176-1924 ^{2,9}	1280 ¹⁹	1198-1508 ¹⁴		776-777 ²	1918 ¹⁹	
	Folate (µg)	100-435 ^{4,5,6}	110 ¹⁹	527 ²		117-118 ²	419 ¹⁹	
	Thiamine (mg)	0,2-1,7 ^{2,4,7}	0,2 ¹⁹	0,7 ²	0,1 -0,6 ¹	0,9 ²	0,8 ¹⁹	0,1 ¹⁸ -0,3 ²
	Riboflavine (mg)	0,1-0,3 ^{4,7}	0,1 ¹⁹	0,2 ²		0,1 ²	0,3 ¹⁹	
Composés bioactifs et/ou antinutritionnels	Raffinose (mg)	500-1000 ⁴		240-1050 ¹⁶			100-1400 ¹²	
	Stachyose (mg)	1700-6000 ⁴		350-860 ¹⁶			1200-6900 ¹²	
	Verbascose (mg)	600-1300 ⁴					Trace ¹²	
	Phytates* (mg)	670-1520 ³		157-654 ¹⁷	100 -200 ¹		1000-2300 ¹²	
	Polyphénols (mg)	63-692 ¹⁰		41-129 ¹⁷				

* : IP6 ; ¹ Chickwendu, (2007) ; ² FAO, (2012) ; ³ Madode *et al.*, (2012) ; ⁴ (Gonçalves *et al.*, 2016); ⁵ Coffigniez *et al.*, (2019) ; ⁶ Hoppner and Lampi, (1993) ; ⁷ Uzogara *et al.*, (1991), ⁸ Harmankaya *et al.*, (2016) ; ⁹ (Stadlmayr *et al.*, (2010) ; ¹⁰ Sombié *et al.*, (2018), ¹¹ Jonnala *et al.*, (2006), ¹² Medic *et al.*, (2014), ¹⁴ Singh *et al.*, (1984) ; ¹⁵ Aruna and Devindra, (2016) ; ¹⁶ Singh, (1988) ; ¹⁷ Sekhon *et al.*, (2017) ; ¹⁸ Olujobi, (2012) ; ¹⁹ FAO, (2020)

Tab 1. 2 : Intérêt des légumineuses sur la santé

MCA*	Rôle des légumineuses	Etudes (Travaux de recherche et revue)
Diabète type 2	Réduction de l'index glycémique du régime alimentaire et de l'apport en lipides.	<ul style="list-style-type: none"> - Objectif : Effet de la consommation de légumineuses sur l'index glycémique (IG) par mesure de l'hémoglobine A1C. Méthode : (<i>Travaux de recherche</i>) 121 participants atteints de diabète de type 2 ont été soumis à aléatoirement à un régime de légumineuse à faible IG ($\approx 190\text{g/jour}$) ou la consommation d'aliments à base de blé entier sur une période de 3 mois. Résultats : Diminution de l'A1C de 0,5% chez les individus ayant consommé des légumineuses et de 0,3 % chez les individus ayant consommé le blé (Jenkins <i>et al.</i>, 2012). - Autres études montrant l'effet positif des légumineuses dans la réduction de l'hémoglobine A1C et le taux de glucose dans le sang : (Rizkalla <i>et al.</i>, 2002; Barnard <i>et al.</i>, 2009).
Hyperlipidémie	Réduction du taux de cholestérol total et du cholestérol LDL	<ul style="list-style-type: none"> - Objectif : Evaluation de l'effet de la consommation de légumineuse autre que le soja sur le taux de lipides dans le sang. Méthode : (<i>Revue</i>) Sélection aléatoire de 10 essais cliniques ayant été réalisés sur une durée de 3 semaines minimum et rapportant des données sur le taux de lipides dans le sang après la consommation de légumineuses autres que le soja. Résultats : La variation moyenne du cholestérol total chez les consommateurs de

Tab 1. 2 (suite) : Intérêt des légumineuses sur la santé

Hyperlipidémie (suite)		<p>légumineuses par rapport au groupe témoin était de -11,8 mg/dL (IC à 95 % -16,1 à -7,5) et la variation moyenne du cholestérol LDL était de -8,0 mg/dL (IC à 95 % -11,4 à -4,6) (Bazzano <i>et al.</i>, 2011).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Autre étude : Hosseinpour-Niazi <i>et al.</i>, (2015)
Hypertension	Effet réducteur sur la pression artérielle du fait de la présence de potassium, magnésium et de fibres	<ul style="list-style-type: none"> - Objectif : Détermination de l'effet de la consommation de légumineuses sur la pression artérielle. Méthode : (Revue) Sélection de huit études cliniques impliquant au moins 500 personnes dont la moitié était en surpoids. Résultats : Réduction de la pression artérielle chez les individus ayant consommé des légumineuses (Jayalath <i>et al.</i>, 2014). - Autre étude : (Venn <i>et al.</i>, 2010)
Obésité	Satiété développée par la présence de fibres, protéines et des glucides lents à la digestion dans les légumineuses	<ul style="list-style-type: none"> - Objectif : Détermination de l'effet de la consommation de haricots sur les apports en nutriments et quelques paramètres physiologiques. Méthode : utilisation des données de l'enquête nationale sur la santé et l'examen (NHANES) 1999-2002 et une enquête de rappel de 24h. Résultats : Les consommateurs de légumineuses étaient également beaucoup moins susceptibles d'être obèses ($IMC > 30 \text{ kg/m}^2$) que les non-consommateurs (Papanikolaou and Fulgoni, 2008).

Source : Polak *et al.*,(2015)

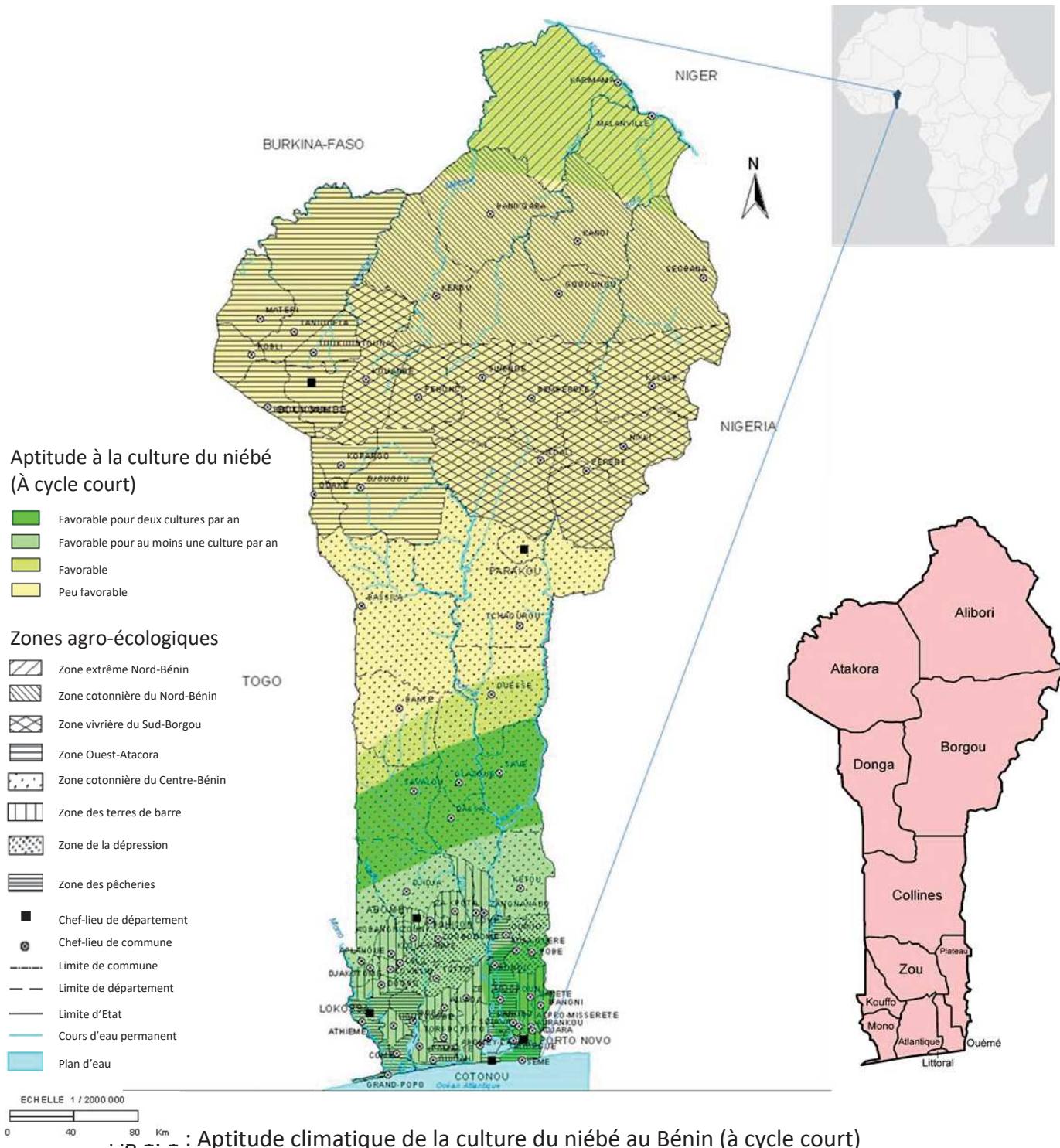
1.2. Le niébé, légumineuse emblématique d'Afrique de l'ouest

1.2.1. Origine, caractéristiques morphologiques et culture

Le niébé (*Vigna unguiculata* (L) Walp) est l'une des plus anciennes cultures (Gómez and Mejía, 2004). C'est une légumineuse herbacée annuelle (Gbaguidi *et al.*, 2015). Le genre *Vigna* se compose de plus de 100 espèces différentes présentant une grande diversité morphologique, largement répandues dans les régions tropicales et subtropicales (Oyewale *et al.*, 2014). Au Bénin, et dans la sous-région Afrique de l'Ouest, le niébé est généralement désigné sous le terme de « haricot ». L'origine précise du niébé fait l'objet de plusieurs spéculations et discussions depuis de nombreuses années. Les premières observations ont montré que les variétés de niébé cultivées en Asie sont très diverses et morphologiquement différentes de celles qui poussent en Afrique, ce qui suggère que l'Asie et l'Afrique pourraient être les régions d'origine de cette culture. Cependant, l'absence de variétés sauvages en Asie comme géniteur possible amène à rejeter l'origine asiatique. Sur la base de la répartition des espèces sauvages de niébé, l'Ethiopie, l'Afrique australe, occidentale et centrale sont considérées comme les régions de grande diversité (Timko and Singh, 2008). Les graines de niébé cultivées pèsent entre 8 et 32 mg par unité de graine et ont une forme allant de ronde à réniforme. Les gousses sont cylindriques et peuvent être courbées ou droites, contenant environ 8 à 15 graines. Le tégument de la graine peut être lisse ou ridé et de différentes couleurs (blanche, crèmeuse, verte, chamois, rouge, marron et noire) (Timko *et al.*, 2007). Henshaw, (2008) ont montré que les dimensions des graines de niébé à savoir la longueur, la largeur et l'épaisseur sont respectivement de 6-10 mm, 4-7mm et 3-5 mm.

En Afrique subsaharienne, le niébé arrive à maturité plus tôt que les autres cultures (sorgho, mil, igname) et peut être utilisé immédiatement à la place des aliments de base (Dovlo *et al.*, 1976). Au Bénin, la culture du niébé et les pratiques post-récoltes restent traditionnelles et peuvent varier au sein d'une même localité ou d'une localité à l'autre dans le pays. La monoculture est la pratique la plus courante pour la production du niébé dans le sud du Bénin, plus particulièrement dans la vallée, tandis que la culture en association (avec le maïs ou l'arachide) et la monoculture sont pratiquées à la même fréquence dans le nord du pays (Houssou *et al.*, 2011). Plusieurs facteurs biotiques et abiotiques réduisent la croissance et le rendement du niébé. Les sols pauvres, la sécheresse, la chaleur, l'acidité et le stress dû à la rotation des cultures avec les céréales sont parmi les facteurs abiotiques qui causent la

réduction du rendement du niébé. En ce qui concerne les stress biotiques, les insectes causent les dommages les plus graves, qui peuvent entraîner une perte de rendement de 100 % (Gbaguidi *et al.*, 2015). Les régions du sud au centre du Bénin sont celles favorables à au moins une culture de niébé par an (Fig 1.1).



(Source CENAP, projet FAO-pédologie, Avril 1982) et Carte du Bénin avec ses 12 départements

(source : www.populationdata.net)

1.2.2. Production des légumineuses et distribution du niébé en Afrique de l'Ouest

Au Bénin, on note une grande variation au niveau des données de production des différentes légumineuses cultivées (Tab 1. 3). L'arachide, le niébé ainsi que le soja représentent les trois premières légumineuses produites en quantités importantes. Sur l'ensemble des légumineuses produites, le niébé vient en seconde position après l'arachide en terme de quantité produite durant la période de 2008-2013. Le rendement moyen des graines de niébé était de 835 kg/ha comparativement à celui de l'arachide qui était de 907 kg/ha (INSAE, 2019). En effet, les données existantes sur la période de 2008 à 2012 montrent que la culture de l'arachide représentait 7% des superficies cultivées face au niébé représentant 5% (INSAE, 2019). A cela s'ajoute, la forte demande d'arachide pour la production régulière d'huile artisanale qui est quotidiennement utilisée dans les ménages au Bénin. Ces deux facteurs pourraient expliquer la différence entre les quantités produites pour ces deux cultures. Dans les conditions favorables de culture, le rendement du niébé peut atteindre 1200 à 1500 kg/ha (AHO, 1988). Ainsi les faibles rendements enregistrés pourraient être dus à des problèmes de fertilité du sol ou la présence de ravageurs au cours de la culture.

Tab 1. 3 : Production des légumineuses (en tonnes) au Bénin

Légumineuse	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013
Arachide	136 796	129 814	154 403	131 790	121 510
Niébé	98566	88154	107362	85497	93 216
Soja	32466	57307	62987	67154	72 994
Voandzou	13031	11250	14942	12696	6252
Pois d'angole	5092	2274	1842	1423	2799
Lentille de terre	1849	1054	905	976	820

Source : INSAE, (2019)

Le niébé est une légumineuse cultivée dans différentes régions du monde principalement dans les zones semi-arides et arides telles que les zones sahélienne et soudanienne. En Afrique, la production du niébé est plus répandue dans la zone subsaharienne avec le Nigéria, le Niger et le Burkina Faso, les trois premiers producteurs (Fig 1.2) dont la production représente 83% de la production mondiale (Rawal and Navarro, 2019).

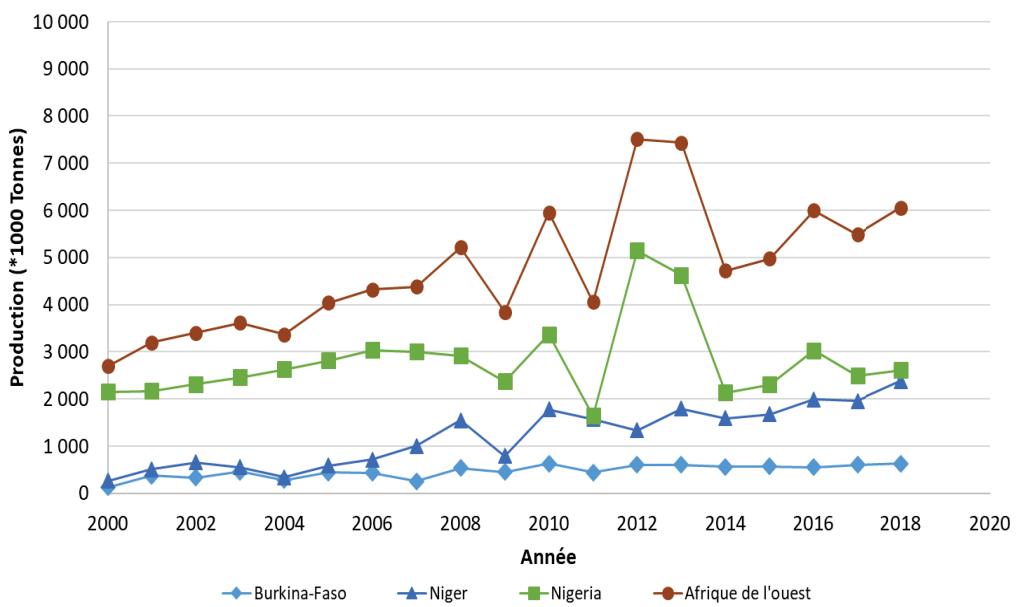


Fig 1. 2 : Production annuelle du niébé (graines sèches) en Afrique de l'Ouest et dans les trois premiers pays producteurs de la sous-région
Source : Données FAOStat, consultée le 31/08/2020.

Concernant la chaîne de distribution, le niébé passe de l'agriculteur au consommateur par différents canaux. Dans la plupart des pays d'Afrique de l'ouest, les agriculteurs vendent leurs excédents commercialisables à des assembleurs ruraux qui, à leur tour, vendent à des grossistes urbains directement ou par l'intermédiaire de commissionnaires (Langyintuo *et al.*, 2003). La distribution du niébé s'effectue bilatéralement entre certains pays. C'est le cas du Bénin et du Nigéria où l'approvisionnement s'effectue réciproquement (Fig 1.3).

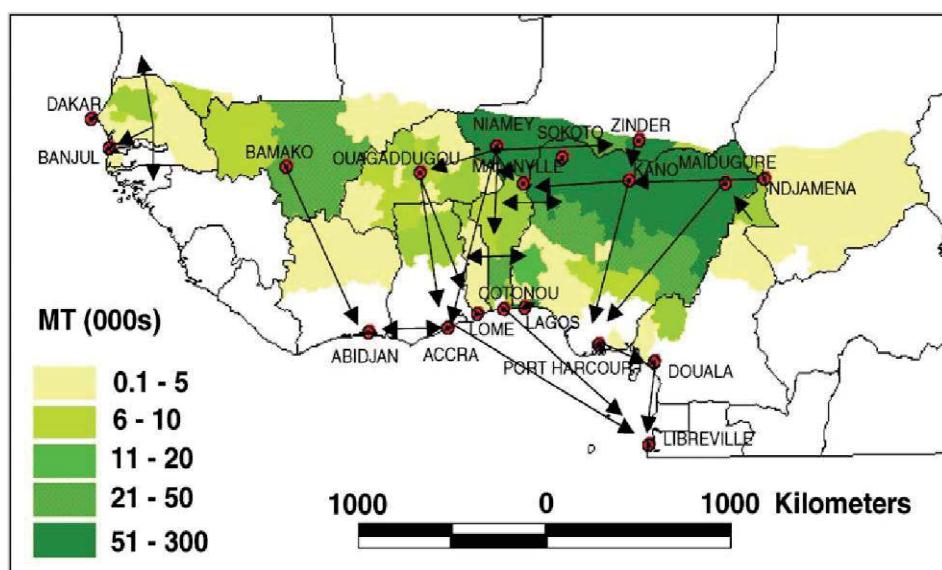


Fig 1. 3 : Distribution du niébé entre les pays de l'Afrique de l'ouest
Source : Langyintuo *et al.*, (2003)

1.2.3. Pratiques de consommation du niébé en Afrique de l'Ouest et au Bénin

1.2.3.1. Aliments traditionnels à base de niébé

En Afrique subsaharienne, les graines de niébé sont principalement destinées à la consommation humaine. Les aliments à base de niébé sont consommés par toutes les tranches d'âge. Cependant, de nombreuses mères hésitent à donner du niébé à leurs enfants de peur de provoquer des problèmes digestifs. Mais plusieurs aliments digestes peuvent être préparés si les enveloppes sont retirées des graines (Dovlo *et al.*, 1976) ou si des techniques d'élimination des composés entraînant ces problèmes de digestibilité sont appliquées. Le niébé peut être préparé sous différentes formes impliquant l'utilisation de divers procédés de transformation tels que la cuisson à l'eau, la cuisson à la vapeur, la friture (Tab 1. 4). D'autres opérations préliminaires comme le décorticage, la mouture et/ou le trempage sont parfois appliquées aux graines. Certains plats traditionnels à base de niébé contiennent également d'autres matières premières telles que les céréales (maïs, riz), tubercules (igname) et racines (manioc). L'ensemble des plats de niébé peut être catégorisé en différents groupes à savoir : les beignets, les ragoûts et purées, les plats mixtes (préparés en combinaison avec d'autres matières premières), les sauces et les gâteaux cuits à la vapeur (Tab 1. 4).

Tab 1. 4 : Aliments à base de niébé consommés en Afrique de l'Ouest

	Aliments à base de niébé	Description	Autres appellations
beignets	Ata	Beignets de niébé décortiqué et trempé	Akara (Nigeria) Kosé (Ghana)
	Ata-doco/Doco	Beignets à base de farine de graines de niébé entières ou décortiquées	
	Ataclè	Beignets à base de farine de graines de niébé entières ou décortiquées ayant subi deux fritures et habituellement conservés dans de l'huile	
Ragoûts ou purée	Abobo	Niébé bouilli avec une quantité importante d'eau ; les graines sont désintégrées au cours de la cuisson donnant un jus de texture consistante dans lequel baigne les graines de niébé	Ewa-ibiji (Nigeria)
	Féchoida	Purée obtenue avec du niébé cuit à l'eau, pilé et tamisé. L'extrait obtenu est ensuite cuit pour obtenir un aliment consistant.	

Tab 1. 4 (suite) : Aliments à base de niébé consommés en Afrique de l'Ouest

Ragoûts ou purée (suite)	Vêyi	Niébé bouilli avec une quantité limitée d'eau et l'évaporation complète de l'eau est recherchée après la cuisson	
	Adowè	Niébé décortiqué ayant subi une cuisson à l'eau et donnant une texture de purée après cuisson	
Plats mixtes	Atassi/Waakye	Mélange de niébé et de riz cuit à l'eau	
	Abla/Cowé	Mélange de farine de maïs, de farine de niébé et d'extrait de noix de palme cuit à la vapeur dans des feuilles de bananier	
	Adalou/Atchon-kouin	Cuisson à l'eau de graines de niébé et du maïs	
	Adjagbé	Mélange de niébé, de feuilles de niébé, de farine de maïs et d'huile de palme.	
	Toubani	Pâte de niébé décortiqué mélangée avec de la farine d'igname ou de manioc et cuite à la vapeur dans des boîtes de conserve ou des feuilles	
	Djongoli/Zankpiti	Mélange de niébé cuit à l'eau avec la farine de maïs et huile de palme/extrait de noix de palme	
Sauce	Yoyouè	Friture de farine de niébé	
	Akpada	Sauce de farine de niébé et de tomate	Gbegiri (Nigeria)
Gâteau cuit à la vapeur	Magni-Magni/Lèlè	Pâte de niébé décortiqué mélangée avec l'huile de palme et cuite à la vapeur dans des feuilles de bananier ou dans des boîtes de conserve recyclées	Moin-Moin (Nigeria)

Source : Houssou *et al.*, (2011); Madode *et al.*, (2011); OECD, (2019)

Le tableau 1.5 présente des quantités consommées annuellement par personne dans différents pays entre 1990-1999. Ces quantités ont été déterminées sur la base des données de production fournies par les institutions de statistiques de chacun des pays ou par la FAO. En moyenne, plus de 18 kg/personne/an de niébé ont été consommés par les Nigérians pendant cette décennie. Le Bénin, le Togo et Ghana viennent en seconde position avec des quantités similaires estimées à 9 kg/personne/an. Les quantités de consommation annuelles par habitant dans certains pays de forte production tels que le Niger et Burkina Faso étaient faibles par rapport à celles des pays produisant moins avec une moyenne de 1,5 kg dans chacun de ces deux pays. La demande pour la transformation industrielle est négligeable et se limite en grande partie à l'utilisation de petites quantités de niébé au Sénégal et au Ghana

pour la fabrication des biscuits, la formulation des farines infantiles et autres aliments pour bébé (Langyintuo *et al.*, 2003).

Tab 1. 5 : Quantités de graines de niébé consommées en Afrique de l'ouest entre 1990-1999

Pays	Production (x1000 t)	Consommation (kg/personne/an)
Nigeria	1691	18
Niger	359	1,5
Mali	79	1,5
Burkina Faso	156	1,5
Togo	38	9
Bénin	64	9
Sénégal	32	1,5
Ghana	57	9
Mauritanie	17	2,5
Côte d'Ivoire	20	1,8
Chad	21	1,5

Source : Langyintuo *et al.*, (2003)

En utilisant la méthode de rappel de 24 heures dans le cadre d'une enquête nationale réalisée en 2008 au Bénin, Gandonou *et al.*, (2019) ont déterminé en moyenne une consommation de 7,4 kg/an/adulte et 5,3 kg/an/habitant. Les consommations annuelles par adulte ou par habitant étaient faibles dans le Borgou et la Donga, deux départements au nord du Bénin, situés entre le centre et l'extrême nord (Fig 1.1). En moyenne dans les grandes agglomérations urbaines (Cotonou, Porto-Novo, de Parakou et de Bohicon et l'agglomération Calavi-Godomey), la consommation était de 8,1 kg/an/adulte et 6,6 kg/an/habitant. Dans les agglomérations urbaines secondaires, les consommations par adulte ou par habitant étaient faibles et variaient entre 1,2 et 1,9 kg/an. En milieu rural, la consommation était de 8 kg/an/adulte et 5,4 kg/an/habitant. Les quantités de consommation du niébé obtenues dans cette étude quelle que soit la zone (rurale vs. urbaine) sont faibles par rapport à la quantité de référence proposée par "The Eat Lancet Commission (une commission regroupant des chercheurs de différents domaines et définissant des objectifs scientifiques pour une alimentation saine et durable)" qui est de 50 g de légumineuses graines sèches par jour soit une consommation annuelle de 18 kg/personne (Willett *et al.*, 2019).

1.2.3.2. Stockage du niébé : Impact sur les graines et les aliments dérivés

La principale contrainte au cours du stockage des graines de niébé est qu'elles soient bien sèches afin d'éviter des pertes post-récoltes. Plusieurs facteurs peuvent entraîner l'altération des graines au cours de leur stockage. On peut distinguer des facteurs physiques tels que la température et l'humidité ainsi que des facteurs biologiques tels que les moisissures et insectes. Tous ces facteurs sont étroitement liés. Il est donc nécessaire de trouver des conditions optimales pour une meilleure conservation des graines. L'optimum des activités biologiques se situe souvent vers 30°C, température couramment observée dans les régions tropicales (Cruz *et al.*, 2016). Des techniques comme le séchage des graines au soleil après la récolte sont parfois utilisées pour atteindre une teneur en eau faible proche de 10% (Kaptso *et al.*, 2008).

Le stockage des graines de niébé peut présenter des effets adverses au cours des procédés de transformation. Lors de la cuisson hydrothermique par exemple, la longue durée de cuisson est l'un des problèmes causés par la dureté des graines de légumineuses qui se développe au cours du stockage. Ce phénomène de "dures à cuire" ou hard-to-cook en anglais est le plus souvent expliqué de la manière suivante: pendant le stockage, les ions calcium (Ca^{2+}) sont libérés des complexes phytate-calcium et migrent vers la lamelle centrale de la paroi cellulaire où ils se lient aux groupements carboxyles de la pectine, formant un complexe insoluble et causent une barrière à la pénétration de l'eau pendant la cuisson (Phillips *et al.*, 2003). L'effet des conditions de stockage des graines de niébé sur les caractéristiques physico ainsi que sur la préparation des beignets de niébé a été étudié par Hung *et al.*, (2002). Dans leur étude, ils ont montré que l'utilisation de graines de niébé stockées à -18°C et 30°C avec une humidité relative (HR) de 33% permettait de produire des beignets de meilleures caractéristiques physico-chimiques comparativement aux beignets obtenus avec des graines stockées aux mêmes températures, mais avec une HR de 64% ainsi qu'à 25°C avec une HR 75%.

1.2.4. Procédés de transformation du niébé récurrents en Afrique de l'Ouest

En général, la transformation des légumineuses améliore la digestibilité, les qualités sensorielles (Tharanathan and Mahadevamma, 2003). De nombreuses opérations unitaires sont utilisées au cours de la transformation des graines de niébé. Ces traitements impliquent parfois l'utilisation des techniques de fractionnement (décorticage) et/ou de fragmentation

des graines (mouture), mais aussi des traitements à des températures ambiantes (trempage) et élevées (cuisson à l'eau, friture).

1.2.4.1. Trempage

Le trempage est une opération unitaire cruciale utilisée dans différents procédés de transformation des légumineuses comme la cuisson à l'eau, qui, réalisée avant cette étape, favorise une cuisson rapide des graines. En effet, au cours du procédé de trempage, la dureté de la graine définit son niveau d'imbibition, qui dépend de la durée de trempage. Le trempage est également appliqué comme opération préliminaire dans d'autres procédés tels que la germination et la fermentation (Chigwedere *et al.*, 2019). Durant le trempage, les graines de niébé absorbent de l'eau jusqu'à atteindre un équilibre et gonflent en volume (Kaptso *et al.*, 2008; Coffigniez *et al.*, 2019a). L'eau absorbée lors du trempage est fonction à la fois du temps de trempage et de la température.

Les graines de niébé sont principalement caractérisées par un tégument, un hile, le cotylédon. Les protéines et l'amidon du cotylédon (Fig 1.4) ainsi que les caractéristiques physiques telles que l'épaisseur du tégument et la taille du micropyle contribuent de manière significative à la quantité d'eau absorbée (Sefa-Dedeh *et al.*, 1979). Le tégument joue un rôle important au cours de l'absorption car, c'est le premier site par lequel le transfert d'eau se fait vers la graine. La modification de la conformation de la graine suite à l'absorption initiale d'eau entraîne l'ouverture du micropyle et du raphé (extrémités au niveau du hile) permettant ainsi l'entrée d'eau dans la graine par ces deux régions spécifiques (Coffigniez, 2018).

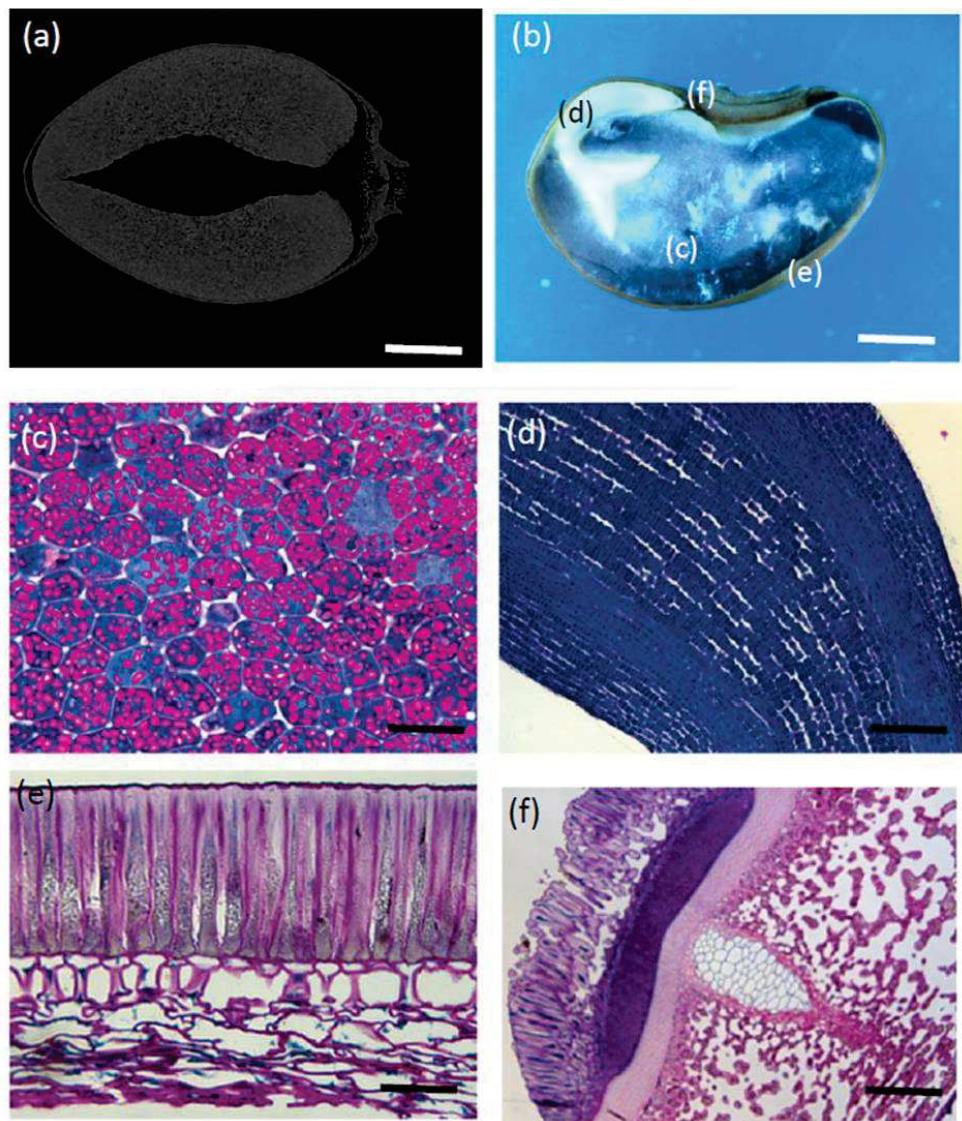


Fig 1. 4 : Morphologie de la graine de niébé et microstructure

Source : Coffigniez, (2018)

(a) colorée au lugol (noir=amidon), visualisée à la loupe binoculaire (b) ainsi que de ses structures particulières visualisées au microscope, dont les cellules parenchymateuses du cotylédon colorées au PAS (bleu=protéine ; rose=amidon (c), l'axe embryonnaire coloré au PAS (d) le tégument coloré au bleu de toluidine (e) et le micropyle coloré au bleu de toluidine (f). Sur le micrographie (b), les zones de prélèvement de (c), (d), (e) et (f) sont visualisables.

1.2.4.2. Cuisson à l'eau

Le trempage et la cuisson des légumineuses sont deux opérations qui peuvent être effectuées simultanément ou distinctement, chacune ayant un rôle spécifique. Comme écrit précédemment, au cours du trempage, les légumineuses sont trempées jusqu'à atteindre une teneur en eau d'équilibre, tandis que lors de la cuisson, de la chaleur est introduite pour

provoquer le ramollissement et une déstructuration des graines (Sefa-Dedeh *et al.*, 1979; Taiwo and Akanbi, 1997). Certains sels comme NaCl, KCl ou NaHCO₃ peuvent être incorporés à l'eau de cuisson. Ces différents sels influent sur le degré d'hydratation des graines ainsi que sur la fermeté. Sur des graines de niébé dont la durée de stockage était de 1 an, Ávila *et al.*, (2015) ont montré que l'utilisation du NaCl (1-2,5%) ou du KCl (2,5%) prolonge la durée de cuisson tandis que le traitement avec du NaHCO₃ (1-2,5%) ou du KCl (1%) réduit considérablement le temps de cuisson. En effet, Uzogara *et al.*, (1988) ont rapporté que l'utilisation d'agents alcalins comme le NaHCO₃ favorise une forte absorption d'eau par la graine ce qui entraînerait un degré de gélatinisation élevé au cours de la cuisson et donc le ramollissement de la graine. L'effet adverse observé pour les sels NaCl et le KCl pourrait être lié à leur concentration au niveau l'eau de cuisson. Ávila *et al.*, (2015) ont rapporté que des concentrations plus importantes de sels réduisent les potentiels osmotiques, ce qui empêche les graines ayant un potentiel hydrique plus élevé d'absorber l'eau, compromettant ainsi la cuisson.

Contrairement au trempage à température ambiante (30 °C) où de légères modifications de la structure des graines sont observées, avec un faible transfert de matière, à des températures plus élevées (60 °C et 95°C), la rupture de la paroi cellulaire se produit en raison de la β-élimination des pectines qui entraîne leur dépolymérisation (Coffigniez *et al.*, 2019a). Le phénomène de gélatinisation de l'amidon joue également un grand rôle au cours de l'opération de cuisson. Coffigniez *et al.*, (2018) ont montré qu'après une cuisson à 95°C pendant 15 min, 30 min et 1h, le degré de gélatinisation de l'amidon était respectivement 11%, 42% et 100%. Ces résultats suggèrent ainsi qu'à des températures avoisinant 95°C, la cuisson des graines est complète après une durée de 1h.

1.2.4.3. Friture

La friture est l'une des opérations unitaires les plus anciennes et les plus courantes utilisées dans la préparation des aliments (Bouchon, 2009). Il existe deux types de friture à savoir la friture plate et la friture profonde (Rossell, 2001). Les aliments frits sont très répandus en Afrique de l'ouest et sont désirés à cause de leur palatabilité. Par exemple, les beignets de niébé sont obtenus par friture profonde et sont très appréciés par la population. La friture profonde peut être définie comme un procédé de cuisson des aliments par immersion dans de l'huile comestible à une température supérieure au point d'ébullition de l'eau, 150-200°C

(Farkas *et al.*, 1996) permettant une cuisson rapide des aliments. Au cours de l'opération de friture, des transferts de chaleur et de matière s'effectuent simultanément. Le transfert de matière pendant la friture ne se limite pas au déplacement de l'eau contenue dans l'aliment vers l'huile de friture, mais aussi à celui de l'huile vers l'aliment (Bouchon, 2009). Pendant la friture des aliments, la chaleur est transférée à travers la surface de l'aliment qui est immergée par convection et ensuite de la surface de l'aliment à leur centre par une combinaison de conduction et d'advection. L'eau se déplace du produit vers la surface d'évaporation, ensuite se transforme en vapeur et quitte le produit (Fig 1.5).

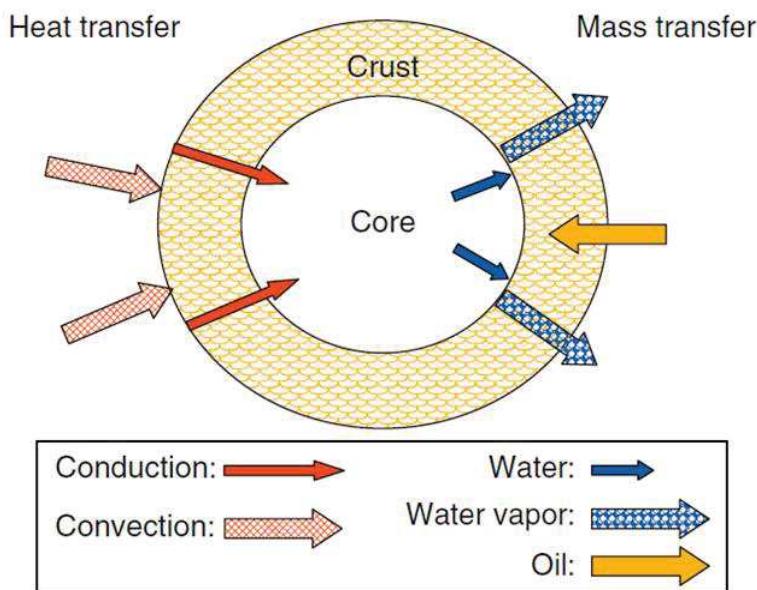


Fig 1. 5 : Schéma du transfert simultané de chaleur et de matière pendant la friture

Source : Bouchon, (2009).

L'opération de friture peut être divisée en 4 étapes (Farkas *et al.*, 1996). La première étape, période de chauffage initiale, est la phase pendant laquelle la surface du produit est chauffée de sa température initiale à la température d'ébullition de l'eau. Cette étape est généralement de courte durée et une quantité négligeable d'eau est perdue par l'aliment. La deuxième étape, phase d'ébullition de la surface, entraîne une perte rapide d'eau au niveau de la surface, une augmentation du coefficient de transfert de chaleur de cette dernière et un début de formation de croûte. La troisième étape représente la période pendant laquelle la température au cœur du produit atteint celle de l'ébullition de l'eau. C'est l'étape la plus longue. La quatrième et dernière étape décrit la fin de la perte d'humidité du produit pendant la friture. Cette étape peut être causée par une élimination complète de l'eau de l'aliment.

(comme dans le cas des chips de pomme de terre par exemple) ou par la réduction du transfert de chaleur au niveau de l'interface croûte-mie.

La friture est souvent réalisée en raison de sa capacité à donner des aliments de texture et de saveur uniques (Farinu and Baik, 2005). Cependant, la friture peut également causer des modifications de la valeur nutritionnelle des produits et plusieurs études ont été réalisées afin de comprendre le mécanisme d'absorption d'huile au cours de la friture.

Globalement, trois principaux mécanismes possibles ont été proposés dans diverses études pour décrire les phénomènes d'absorption d'huile (Dana and Saguy, 2006) :

- **Remplacement de l'eau**

Pendant la friture, l'huile remplace l'eau qui s'est évaporée. Lorsque l'aliment est exposé aux températures de friture, l'eau s'évapore rapidement, la surface extérieure devient sèche et une croûte se forme. L'humidité contenue dans le produit frit est transformée en vapeur, ce qui crée un gradient de pression positif. La vapeur s'échappe par les fissures, les capillaires ouverts et les canaux de la structure cellulaire et des membranes. Au fur et à mesure que le processus progresse, l'huile adhère à l'aliment en pénétrant dans les parties vides.

- **Incorporation de l'huile au cours du refroidissement**

Une fois la friture terminée, les aliments sont retirés du bain d'huile et commencent à refroidir, ce qui entraîne une condensation de la vapeur d'eau et une diminution de la pression interne. L'huile ayant adhéré à la surface de l'aliment est aspirée grâce à un effet « sous-vide ». Par conséquent, l'absorption d'huile est un phénomène de surface, impliquant un équilibre entre l'adhésion et le drainage de l'huile lorsque l'aliment est retiré du bain d'huile.

- **Absorption causée par les agents tensioactifs**

Au cours de la friture, l'huile se dégrade et passe d'un mélange pur composé de triglycérides à un mélange de centaines de composés. Certains des composés de dégradation réduisent la tension interfaciale entre l'huile et l'aliment, agissent comme des agents tensioactifs. La formation de tensioactifs favorise davantage le contact entre l'aliment et l'huile de friture, ce qui entraîne une absorption excessive. Ces composés sont aussi responsables de la formation de mousse observée au niveau des huiles usées.

D'autres facteurs tels que la teneur en eau initiale du produit, la microstructure de la croûte, la géométrie du produit, la température et la durée de friture, ainsi que la qualité de l'huile sont à considérer afin de contrôler l'absorption d'huile au cours de la friture (Bouchon, 2009).

1.3. Micronutriments et composés bioactifs du niébé : folates, thiamine, minéraux, alpha-galactosides et fibres, phytates

Les graines de niébé présentent une composition nutritionnelle intéressante avec une teneur en protéines allant de 22 à 30 g/100 g (Tab 1.1). De plus, la teneur en fibres alimentaires des graines de niébé varie de 16 à 21 g/100 g, et elles sont une source importante de micronutriments d'intérêt tels que les vitamines du groupe B (folates, thiamine) et de minéraux (fer, calcium, zinc, magnésium et potassium). Ce potentiel nutritionnel du niébé constitue un facteur important pour éviter des problèmes de carences nutritionnelles dans les pays du sud et explique la nécessité d'étudier ces composés afin de les préserver dans les aliments traditionnels. Dans notre étude, nous avons également ciblé quelques composés bioactifs (alpha-galactosides et phytates) qui sont présents dans la graine de niébé.

1.3.1. Folates

1.3.1.1. Origine et historique

Le terme « folate » est utilisé comme terme générique pour la classe des composés ayant des propriétés chimiques et nutritionnelles similaires à l'acide pteroyl-L glutamique (acide folique) (Blakley, 1987). Le folate est aussi appelé vitamine B9 qui est un composé hydrosoluble.

1.3.1.2. Structure et distribution dans les légumineuses

Le folate est une vitamine soluble dans l'eau avec une structure en 3 parties : un cycle de ptérine lié à un acide para-amino-benzoïque grâce une liaison carbone-azote (C-N), ce dernier portant une chaîne de poly-glutamate à laquelle sont connectés un nombre variable d'acides glutamiques par une liaison γ -peptidique (Delchier *et al.*, 2016a). La structure des folates varie suivant une réduction et une substitution d'une molécule (hydrogène ou groupement carbonyle ou groupement alkyle) au niveau de la ptérine et aussi suivant la longueur de la chaîne de glutamate.

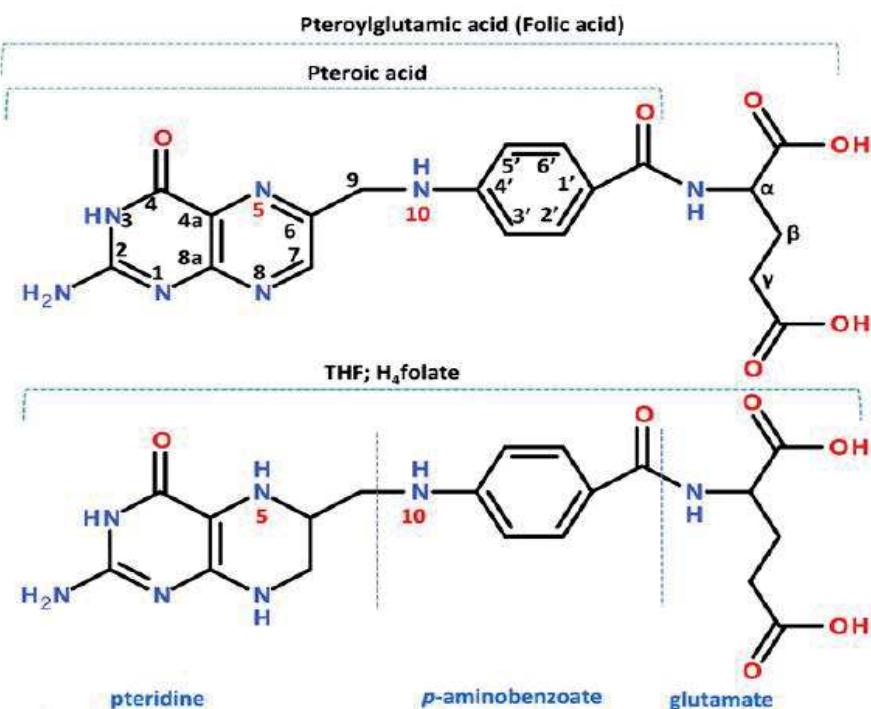


Fig 1. 6 : Structure du folate

Source : Saini et al., (2016)

Les folates dans les matrices alimentaires existent sous diverses formes appelées vitamères et contiennent plusieurs résidus de glutamate, ce qui les rend polyglutamates. Les diverses formes de folate diffèrent par le radical mono-carboné lié à la position N5 et /ou N10 (Fig 1. 6) de l'anneau de ptéridine (Saini et al., 2016). Ainsi on peut trouver les formes dérivées telles que : méthyle (5-CH₃), méthylène (5,10-CH₂), formimino (5-CHNH), formyle (5- ou 10-HCO) et méthényle (5,10-CH) (Tab 1. 6).

Tab 1. 6 : Vitamères de folates et position de leur radical mono-carboné

Nom	Abréviations	Position	
		N5	N10
Acide pteorylglutamique	Acide folique	—	—H
7,8-Dihydrofolate	H ₂ folate	—H	—H
5-Methyl-5,6-dihydrofolate	5-CH ₃ -H ₂ folate	—CH ₃	—H
5,6,7,8-Tetrahydrofolate	H ₄ folate	—H	—H
5-Methyltetrahydrofolate	5CH ₃ -H ₄ folate	CH ₃	—H
5-Formyltetrahydrofolate	5-CHO-H ₄ folate	—CHO	—H
10-Formyltetrahydrofolate	10-CHO-H ₄ folate	—H	—CHO

Source : Eitenmiller et al., (2016)

Dans le niébé, Coffigniez *et al.*, (2019b) ont déterminé cinq vitamères à savoir l'acide folique, le 10-formylfolique acide, 5-formyltétrahydrofolate, 5-methyltétrahydrofolate et le tétrahydrofolate. Tous les vitamères étaient majoritairement concentrés au niveau de l'axe embryonnaire. Le 5-formyltétrahydrofolate représentait 54% de la teneur totale en folates de la graine. Le 5-methyltétrahydrofolate, l'acide folique et le 10-formylfolique acide représentaient respectivement 12%, 16%, et 16% de la teneur totale en folates. La teneur en tétrahydrofolate était négligeable. Dans le pois chiche, Strandler *et al.*, (2015) ont également identifié le 5-formyltétrahydrofolate comme le vitamère majoritaire (49%). Au niveau des légumineuses, on observe des profils différents d'une graine à l'autre ou au niveau des différentes variétés du même type de graine. Contrairement aux résultats obtenus pour le niébé dans l'étude précédente, Delchier *et al.*, (2016) ont montré que le 5-methyltétrahydrofolate était le vitamère prépondérant. Rychlik *et al.*, (2007) ont identifié dans la lentille ainsi que le haricot mungo, le 5-methyltétrahydrofolate comme étant le vitamère majoritaire tandis que dans le soja et le haricot vert c'était le tétrahydrofolate.

1.3.1.3. Absorption, métabolisme et rôle des folates

La plupart des folates alimentaires sont des polyglutamates. Les folates conjugués sont hydrolysés dans l'intestin grêle par la conjugase (pteroyl-polyglutamate hydrolase), une enzyme dépendante du zinc et contenue dans le suc pancréatique, la bile et la bordure des muqueuses. Ainsi, une carence en zinc peut nuire à l'absorption des folates (Lanham-New *et al.*, 2019). Après l'hydrolyse des polyglutamates dans l'intestin en monoglutamates, ils sont absorbés à travers la muqueuse intestinale (Butterworth *et al.*, 1969). La majorité des folates alimentaires subit une méthylation et une réduction dans la muqueuse intestinale pour passer dans le sang principalement sous la forme de 5-methyltétrahydrofolate (forme la plus active) (Lanham-New *et al.*, 2019). L'enzyme assurant la conversion des monoglutamates en 5-methyltétrahydrofolate est la méthylène tétrahydrofolate réductase. Cette enzyme est impliquée dans la méthylation, la réparation et la synthèse de l'ADN (Saini *et al.*, 2016). Les folates biodisponibles jouent un rôle essentiel dans de nombreuses fonctions physiologiques chez l'homme. Les folates sont importants dans la synthèse de l'ADN.

1.3.1.4. Prévalence de la carence en folates

La carence en folates est la principale cause de l'anémie mégaloblastique. Les folates sont considérés comme une vitamine importante pour les femmes enceintes, les femmes en âge de procréer et les enfants. La carence en folates entraîne un risque de défaut de fermeture neural (du fœtus) qui se produit au cours du premier trimestre de la grossesse (Czeizel *et al.*, 2013). Chez l'adulte, la carence en folates est associée à un risque accru de maladies cardio-vasculaires, de cancer et de troubles cognitifs.

Les études d'évaluation du statut en folates se basent souvent sur les concentrations plasmatiques et/ou érythrocytaires. Le taux d'homocystéine (qui ne doit pas être élevée, $> 15 \mu\text{mol/L}$) est souvent déterminé pour évaluer le statut en folates (McLean *et al.*, 2008).

Dans certains pays en Afrique (Sierra Leone, Côte d'Ivoire, Cameroun, Ethiopie), Bationo *et al.*, (2019a) ont rapporté des prévalences de carences en folates variant entre 8 à 86% chez les femmes et les enfants.

Une enquête réalisée sur 276 individus au Bénin et au Togo a montré une prévalence de 62% et de 29% d'hyperhomocystéinémie respectivement dans les zones côtières et de savane de ces pays. Dans les régions côtières, un sous-groupe (15% de la population totale) a été identifié avec un taux d'homocystéine $> 28 \mu\text{mol/L}$ qui était relié à un faible statut en folates ($< 6,75 \text{ nmol/L}$) et en méthylènetétrahydrofolate réductase ((MTHFR)) (Amouzou *et al.*, 2004).

1.3.1.5. Les aliments sources de folates

Les folates sont présents en forte concentration dans les germes de blé, dans certaines céréales, dans les légumineuses et les légumes à feuilles (Delchier *et al.*, 2016a), ainsi que dans les levures et les abats. Les aliments fermentés à base de céréales plus fréquemment consommés en Afrique de l'ouest peuvent également constituer des sources importantes de folates (Bationo *et al.*, 2020).

1.3.1.6. Méthodes de détermination des folates dans les aliments

Les différentes techniques couramment utilisées pour le dosage des folates dans les matrices alimentaires sont fonction des objectifs visés. Certaines méthodes sont adaptées aux aliments fortifiés, car elles ne dosent que la forme de synthèse, l'acide folique. D'autres permettent de déterminer les folates totaux et certaines la quantification de chaque vitamère de folates

contenu dans l'aliment. Le tableau 1.7 présente la description de quelques méthodes existantes, les avantages ainsi que les inconvénients.

Tab 1. 7 : Techniques de dosage des folates dans les aliments

Principe	Etapes clés	Avantages/Inconvénients
Méthode microbiologique Le niveau de croissance du micro-organisme dépendant du folate est proportionnel à la quantité de folate dans le milieu. La croissance est mesurée par le changement de la turbidité de la solution.	-Extraction des folates de la matrice - Hydrolyse enzymatique - Mesure de la turbidité au spectrophotomètre	<u>Avantages :</u> - Méthode gold standard - Coût raisonnable - Mesure des mono- et polyglutamates à la fois - Limite de quantification très basse <u>Inconvénients :</u> - Longue durée pour effectuer l'analyse - Pas d'identification des différentes formes de folates
Méthode chromatographique Séparation chromatographique des isomères de folate suivie d'une quantification basée sur la réponse du détecteur.	-Extraction et hydrolyse des folates, -Purification de l'extrait -Séparation chromatographique et quantification par rapport aux standards	<u>Avantages :</u> -Méthode fiable -Faible interférence des enzymes endogènes de la matrice - Identification des vitamines de folates <u>Inconvénients :</u> -Coût élevé de l'équipement et des standards -Nécessite l'utilisation de standards pour tous les isomères -Détecte jusqu'au mg -Pas adéquate pour les polyglutamates
Enzyme protein binding assay (EPBA) Réaction compétitive entre les isomères de folates et les protéines liées au niveau d'un nombre limité de sites de liaisons spécifiques.	-Extraction et libération des folates -Réaction entre le folate et les protéines liées dans une plaque de micro-titration -Mesure de la couleur de la réaction	<u>Avantages :</u> -Technique rapide (1-3h) -Relativement moins chère -Facile à réaliser <u>Inconvénients :</u> -Variation considérable entre différents kits d'enzymes -Courte durée de vie des kits -Technique inadéquate pour les polyglutamates

Source : Tableau réalisé suivant les informations recueillies dans la littérature.

1.3.1.7. Influence des procédés de transformation sur les folates

Les folates se dégradent durant le stockage de la matière première et au cours des procédés de transformation des aliments. Certaines techniques de transformation permettent

également d'améliorer la teneur en folates dans les aliments (fermentation, germination). Le comportement des folates varie donc en fonction des procédés appliqués au cours de la transformation et des paramètres technologiques impliqués dans ces derniers (température, pH, oxygène, etc.)

Trempage-Cuisson. Des études antérieures ont montré que la perte des folates dans les légumes cuits pourrait être attribuée à la diffusion dans l'eau de cuisson qui est souvent éliminée, plutôt qu'à la dégradation des vitamères (Leichter *et al.*, 1978; Hawkes and Villota, 1989). Les concentrations relatives des différentes formes de folate et la longueur de leur chaîne au niveau des légumineuses sont d'une importance fondamentale dans la dégradation ou la rétention des folates. Par exemple, le 5-formyltétrahydrofolate est thermiquement plus stable que le 5-méthyltétrahydrofolate (Hawkes and Villota, 1989). Une étude réalisée sur le pois chiche et le pois a montré que le trempage suivi d'une cuisson sous pression entraîne une plus grande rétention comparativement à la cuisson à l'eau classique, ce qui suggère que la cuisson sous pression après trempage pourrait être une option pour une rétention maximale des folates dans les légumineuses (Dang, 2000). Coffigniez *et al.*, (2019b) ont étudié les mécanismes de diffusion et de réaction des folates au cours du trempage-cuisson des graines de niébé en couplant les paramètres temps et température. Les teneurs de quatre vitamères de folates (PteGlu, 10-CHO-PteGlu, 5-CHO-H₄folate et 5-CH₃-H₄folate) ont été déterminées dans la graine et l'eau de trempage. A 60 °C et 95 °C, la diffusion de tous les vitamères de folates et l'oxydation du 5-CH₃-H₄folate étaient prédominantes, tandis qu'à faible température (30°C) ces deux phénomènes étaient quasi inexistant. L'immuno-marquage du 5-CH₃-H₄folate a confirmé qu'à température élevée, la molécule diffuse très largement dans les espaces intercellulaires. À température ambiante, les formes PteGlu, 10-CHO-PteGlu, 5-CHO-H₄folate sont fortement inter-converties en 5-CH₃-H₄folate par l'action de diverses enzymes et des réactions chimiques.

Germination. La germination est l'une des techniques de biosynthèse des folates qui peut être employée pour améliorer la qualité nutritionnelle des aliments. Plusieurs études ont été réalisées sur les céréales ainsi que sur les légumineuses en vue d'identifier les conditions optimales de germination permettant d'activer la production des micronutriments d'intérêt comme les folates. Une étude sur le seigle a par exemple montré une augmentation de la teneur en folates de 1,7 à 3,8 fois par rapport à la graine initiale en fonction de la température de germination Kariluoto *et al.*, (2006). Koehler *et al.*, (2007) ont montré l'influence de la

germination du blé à différentes températures (15°C, 20°C, 25°C, 30°C) sur la production des folates. La production était plus élevée à 20°C après 102h comparativement aux autres températures. Dans les graines de niébé, Coffigniez *et al.*, (2021) ont réalisé une germination à 30°C avec un ratio eau-graine de 1:1. Les résultats de cette étude ont montré une interconversion de tous les vitamères en 5-CH₃-H₄folate (forme la plus active) avant 14h de germination et une forte biosynthèse (production enzymatique) du 5-CH₃-H₄folate et du 5-CHO-H₄folate après 48h de germination.

Fermentation. La teneur en folates dans les aliments peut être augmentée au cours de la fermentation (Kariluoto *et al.*, 2006a). Cette augmentation est principalement due aux levures et bactéries (Osseyi *et al.*, 2001; Kariluoto *et al.*, 2004; Saubade *et al.*, 2017). De nombreuses études ont montré que les bactéries lactiques comme *Lactococcus lactis* and *Streptococcus thermophilus* ont la capacité de synthétiser les folates. Dans la famille des bactéries lactiques, les Lactobacilles sont au contraire connus pour leur incapacité à produire des folates (LeBlanc and Sesma, 2007). Cependant, la sélection de certaines de souches de Lactobacillus peut permettre une production des folates au cours de la fermentation. Bationo *et al.*, (2019) ont montré au cours de la préparation du Ben-Saalga (bouillie fermentée à base de mil), une synthèse de folate après 24h de fermentation avec *Lactobacillus fermentum* et *Lactobacillus plantarum*.

Oxydation. Delchier *et al.*, (2014) ont étudié dans les épinards, les purées de haricots et des solutions modèles, l'impact de l'oxygène sur la teneur en vitamine B9 à différentes températures. Leur étude a révélé que les folates n'étaient pas dégradés, quelle que soit la température appliquée (45°C, 65°C ou 85°C) dans les différents produits. Cependant, la présence de 40 kPa d'oxygène a entraîné une perte de folate. Les résultats de cette étude montrent ainsi que l'oxygène est un facteur de dégradation des folates au cours du traitement thermique. Parmi les vitamères de folates, la forme 5-CH₃-H₄folate est la plus susceptible à l'oxydation au cours des traitements (Xue *et al.*, 2011; Delchier *et al.*, 2014; Coffigniez *et al.*, 2019b).

1.3.2. Thiamine

1.3.2.1. Structure chimique et distribution dans les graines de légumineuses

La thiamine (thiamine, vitamine B1), également appelée aneurine, est une vitamine hydrosoluble du groupe B (Bettendorff, 2013). La thiamine est composée de la pyrimidine (4-amino-2-méthyl-5-pyrimidyle) liée au thiazole (4-méthyl 5-β -hydroxyéthylthiazolium) par un pont de méthylène (Fig 1.7). Elle peut être phosphorylée sur son groupe hydroxyle pour former la thiamine monophosphate (TMP), diphosphate (TDP) ou triphosphate (TPP) (Goyer, 2010).

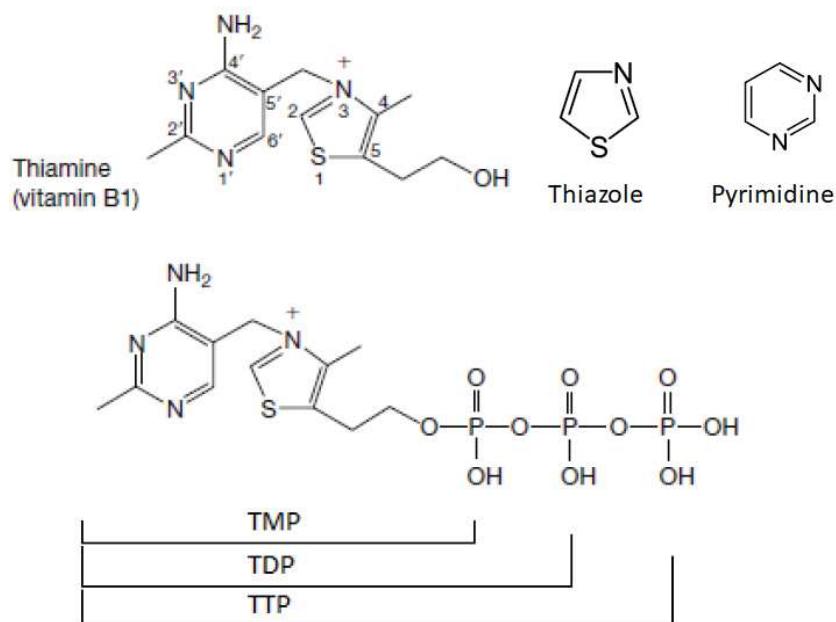


Fig 1. 7 : Thiamine et les formes phosphatées (TMP : Thiamine monophosphate, TDP : Thiamine diphosphate, TPP : Thiamine triphosphate)

Source : Kritikos, (2017)

Pour étudier la distribution de la thiamine dans la graine de *Phaseolus vulgaris L*, Chikubu *et al.*, (1956) ont procédé à la section de la graine en différentes parties à savoir le cotylédon, le tégument, la feuille, l'hypocotyle, le méristème racinaire et la radicule (Fig 1.8). Leur étude a montré que l'embryon contient plus de thiamine (totale et libre) que le cotylédon. La thiamine était abondante dans l'embryon, le méristème racinaire et la radicule. De plus, la thiamine libre représentait 71-93% du total au niveau des différentes parties de la graine (Tab 1. 8).

- 1: Feuilles
 2: Hypocotyle
 3: Méristème racinaire
 4: Radicule
 5: Tégument
 6: Cotylédon

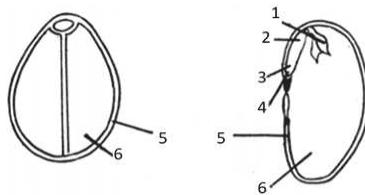


Fig 1. 8 : Sections transversales et longitudinales de la graine de *Phaseolus vulgaris L.*

Source : Chikubu et al., (1956)

Tab 1. 8 : Distribution de la thiamine dans le haricot (*Phaseolus vulgaris*)

Section		Thiamine (mg/100 g base humide)	% thiamine libre par rapport au total
Tégument	Total	0,07 ± 0,0	-
	Libre	0,05 ± 0,0	71
Cotylédon	Total	0,42 ± 0,0	-
	Libre	0,34 ± 0,0	81
Embryon	Total	1,35 ± 0,0	-
	Libre	1,25 ± 0,1	93
Feuille	Total	0,87 ± 0,1	-
	Libre	0,62 ± 0,0	71
Hypocotyle	Total	1,04 ± 0,0	-
	Libre	0,95 ± 0,0	91
Méristème racinaire	Total	3,02 ± 0,1	-
	Libre	2,61 ± 0,1	86
Radicule	Total	4,61 ± 0,3	-
	Libre	3,61 ± 0,25	78

Source : Chikubu et al., (1956)

1.3.2.2. Absorption, métabolisme et rôle physiologique de la thiamine

Le principal site d'absorption de la thiamine (T) dans l'organisme se situe au niveau des parois intestinales, où elle est absorbée sous forme ionique T^+ et transférée dans le sang (Manzetti et al., 2014). Elle est absorbée par transport actif (concentration <2 μM) dans l'intestin grêle, mais lorsque la concentration dépasse le seuil du transport actif (>2 μM), une diffusion passive est possible (Thomson et al., 2002). Pour les formes TDP et TPP, le transfert à travers les membranes est effectué après conversion en TMP et T^+ . Une fois délivrée au cytosol, la

thiamine est métabolisée en ses trois formes phosphorylées dans les tissus et les organes, ainsi que sous la forme cationique (Fig 1.9) (Manzetti *et al.*, 2014).

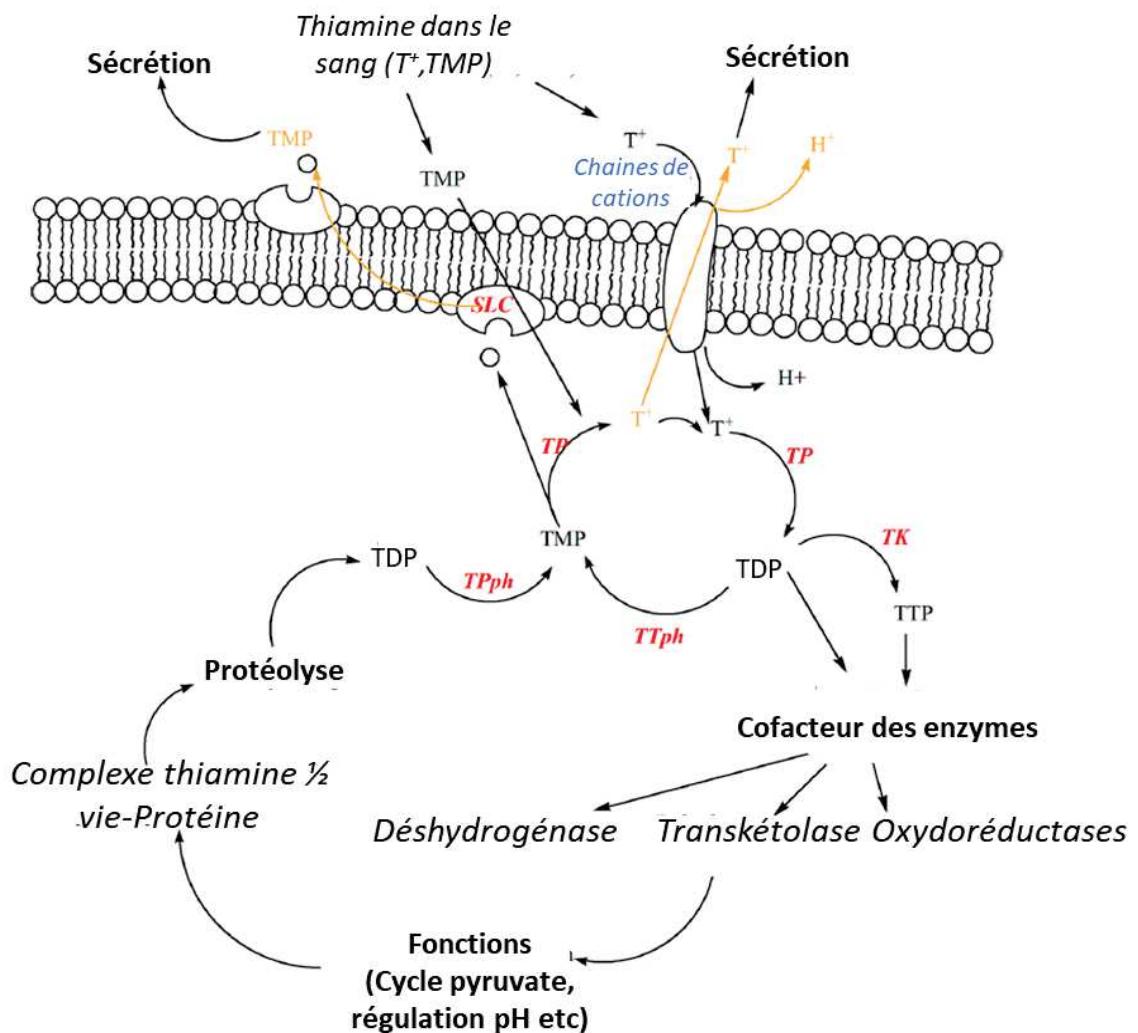


Fig 1. 9 : Cycle de la thiamine et de ses formes dans l'organisme

Source : Manzetti et al., (2014)

Flèches en orange : voie de sécrétion ; TP : thiamine pyrophosphokinase ; TK, thiamine kinase; TPph : thiamine pyrophosphatase ; TTph : thiamine triphosphatase ; SLC, transporteurs.

Après absorption intestinale, la thiamine et la thiamine monophosphate sont phosphorylées pour donner le pyrophosphate de thiamine (encore appelé thiamine diphosphate) : c'est la forme active de la vitamine B1 (Lanham-New *et al.*, 2019). La TDP, qui représente environ 80% de la thiamine totale du corps, se trouve dans les cellules à une concentration 10 à 20 fois plus élevée que celle de la thiamine dans le plasma (Tallaksen *et al.*, 1993). Elle diffuse dans les organes les plus forts consommateurs, le cœur, le foie, le cerveau, et les reins. C'est un cofacteur indispensable des enzymes α -cétoacide-déshydrogénase et transcétolase,

intervenant dans le métabolisme énergétique et notamment dans le métabolisme du glucose et de l'alcool (Quilliot *et al.*, 2017). Par exemple, la TDP sert de cofacteur de pyruvate déshydrogénase pendant la glycolyse (LeClere *et al.*, 2004). Les organes utilisant préférentiellement le glucose sont les plus sensibles au déficit en vitamine B1. C'est principalement le système nerveux. La forme triphosphate joue un rôle complexe de phosphorylation des protéines et permet de réguler les flux de sodium et de potassium dans la cellule nerveuse et est donc également impliquée dans la dépolarisation membranaire et l'influx nerveux, ce qui explique en partie les signes neurologiques en cas de carence (Lanham-New *et al.*, 2019).

1.3.2.3. Manifestation de la carence et importance dans le monde

La carence en thiamine (vitamine B1) se traduit par la maladie appelée béribéri, classiquement considérée comme existant sous forme sèche (paralytique) et humide (œdémateuse). Le béribéri est présent chez les nourrissons dont les mères allaitantes sont carencées. Il survient également chez les adultes ayant des apports élevés en glucides principalement à partir de riz poli et d'aliments riches en facteurs anti-thiamines (thiaminase, polyphenols, flavonoïdes) (FAO/WHO, 2002). Les individus ayant une dépendance alcoolique peuvent avoir un déficit en vitamine B1 ce qui entraîne généralement le syndrome de Gayet-Wernicke (Quilliot *et al.*, 2017). Le déficit en vitamine B1 entraîne un déficit cellulaire en adénosine triphosphate (ATP). Le défaut de synthèse d'ATP conduit à une acidose lactique, une diminution des résistances vasculaires conduisant à un effet shunt et une augmentation du débit cardiaque (Quilliot *et al.*, 2017). Les œdèmes, les irrégularités cardiaques, le retard de croissance et la faiblesse sont aussi d'autres manifestations de la carence en vitamine B1 (Marcus, 2013).

Le risque de carence en thiamine est devenu un véritable problème de santé publique. Ainsi, des programmes de fortification du blé ou du riz sont mis en place dans plusieurs pays du monde (Fig 1.10). Peu de carences en thiamine ont été rapportées dans la littérature mais les apports sont considérés sous-optimaux dans certaines régions du monde (Asie du Sud) (Whitfield *et al.*, 2018).

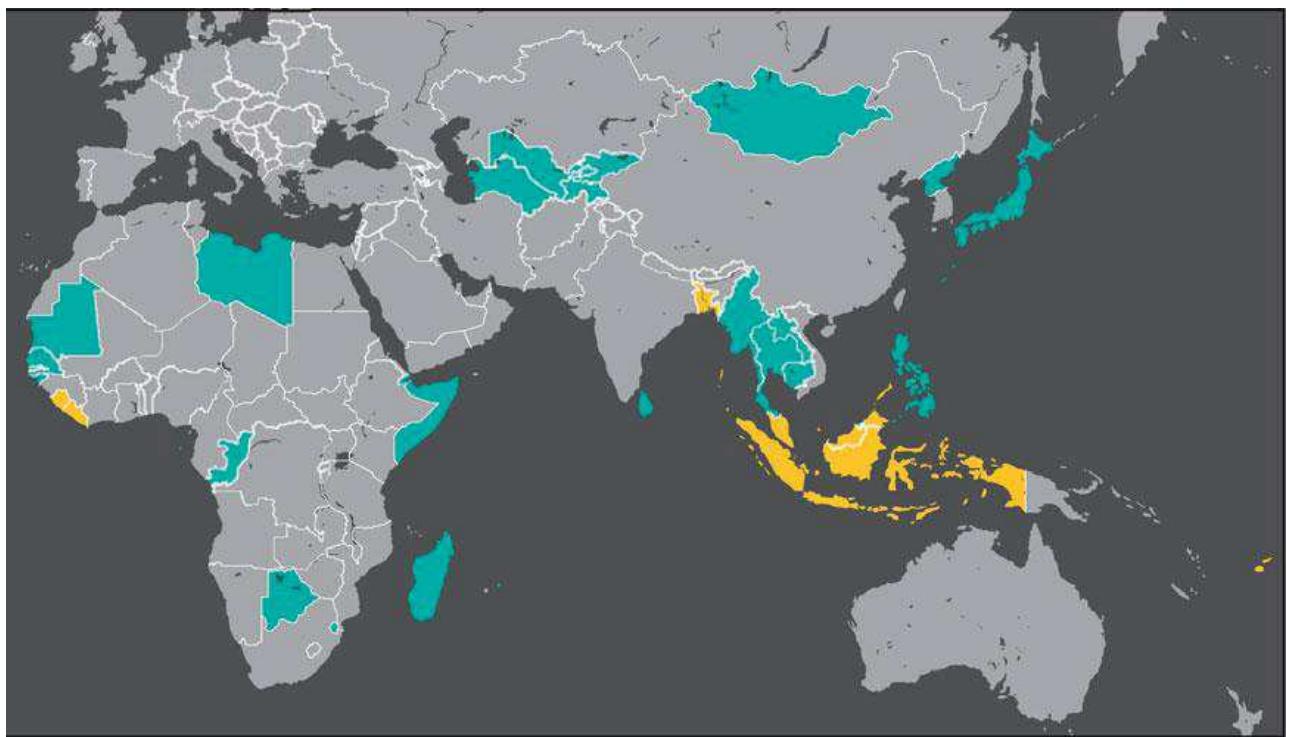


Fig 1. 10 : Disponibilité en thiamine dans le monde

Source : Whitfield et al., (2018)

Bleu turquoise : Apport en thiamine sur la base de l'approvisionnement alimentaire national < 1,2 mg/day ; Jaune : Pays ayant mis en place des programmes de fortification en thiamine du riz ou du blé ; Gris : Apport en thiamine sur la base de l'approvisionnement alimentaire national > 1,2 mg/day

1.3.2.4. Les aliments sources de thiamine

La thiamine est largement présente dans les aliments, dans les graines entières de céréales, dans les viandes notamment celle de porc, ainsi que dans les poissons (Lanham-New et al., 2019). Parmi les aliments consommés en Afrique de l'ouest, les légumineuses figurent comme étant d'excellentes sources de thiamine (Tab 1.9). Cependant comme toutes les autres vitamines hydrosolubles, la teneur en thiamine dans ces aliments peut être réduite lors de la transformation par diffusion dans l'eau de cuisson ou par dégradation thermique. De plus, les polyphénols (plus précisément les tanins) dans les aliments peuvent influencer la thiamine (Lanham-New et al., 2019). Ils réagissent avec la vitamine pour donner le disulfure de thiamine qui est un composé non biodisponible.

Tab 1. 9 : Teneurs en thiamine de quelques aliments consommés en Afrique sub-saharienne

Groupe	Aliment	Thiamine (mg/100g base humide)
Céréales	Sorgho, grain entier, cru	0,26-0,36
	Maïs	0,32
	Petit mil (variétés combinées)	0,29
	Riz brun	0,36
	Riz blanc poli	0,06
Racines et tubercules	Manioc	0,05
	Patate douce à chair jaune	0,09
	Igname	0,07
Légumineuses	Néré, graines, séchées	0,3
	Niébé, brun, sec	0,70
	Niébé, blanc, sec, cru	0,69
	Soja, sec, (variétés combinées)	0,72
Légumes feuilles	Amarante	0,05
	Manioc	0,25
	Vernonia	0,08

Source : FAO (2019)

1.3.2.5. Influence des procédés de transformation

La température, le pH, la durée de stockage ou de cuisson sont tous des facteurs contribuant à la perte de la thiamine dans les matrices alimentaires. De plus, certains composés contenus dans les aliments tels que les protéines, les acides aminés, des sucres réducteurs, les bases inorganiques, peuvent aussi avoir un impact sur la teneur en thiamine entraînant parfois des dégradations (Dwivedi and Arnold, 1973) (Fig 1. 11).

De manière générale, le mécanisme de dégradation de la thiamine se fait suivant deux phénomènes différents à savoir : (1) le clivage de la liaison méthylène –CH₂– reliant la pyrimidine et le thiazole ou (2) l'ouverture du thiazole avec production de sulfure d'hydrogène (Dwivedi and Arnold, 1973; Gregory, 2008).

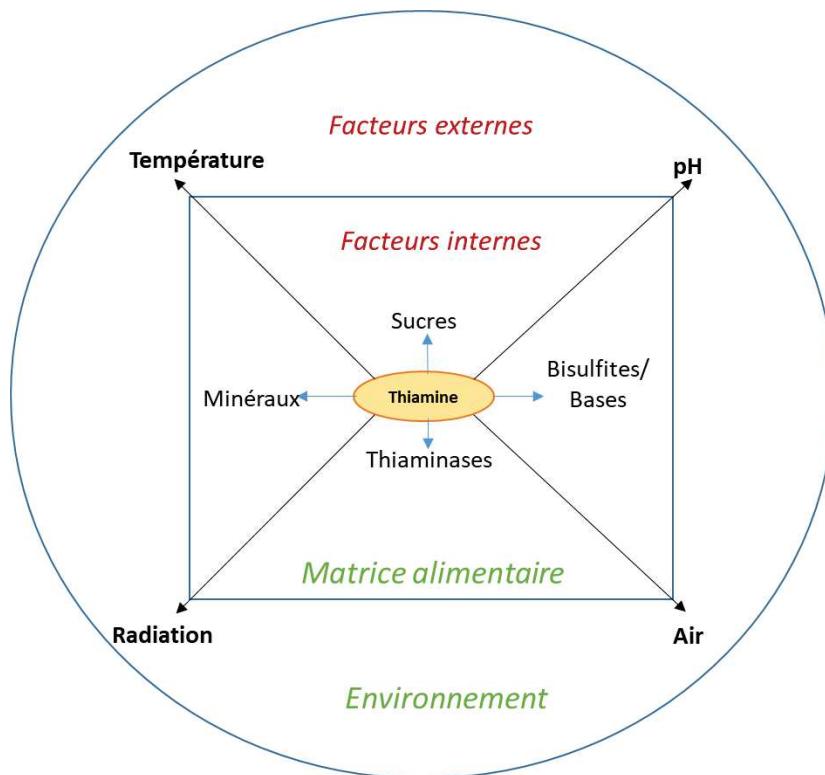


Fig 1. 11 : Synthèse des facteurs influençant la stabilité de la thiamine

Source : schéma réalisé par Lorène Akissoé

La thiamine est fortement influencée par le pH du milieu réactionnel. Dans des conditions acides ($\text{pH} \leq 6$), la dégradation thermique se produit lentement et implique le clivage de la liaison méthylène pour libérer les fractions pyrimidine et thiazole (Fig 1.12). Entre $\text{pH} 6$ et 7 , la dégradation de la thiamine s'accélère et l'on observe une forte augmentation de la fragmentation du cycle thiazole, et à un pH de 8 les cycles thiazoles se décomposent. La dégradation de la thiamine est connue pour donner un grand nombre de composés contenant du soufre qui résultent vraisemblablement de la fragmentation et du réarrangement du cycle du thiazole. La thiamine se dégrade rapidement en présence d'ions bisulfites. Ces ions réagissent principalement avec la forme ionisée de la thiamine. Le clivage de la thiamine par le bisulfite est similaire à celui qui se produit à un $\text{pH} \leq 6$, bien que le produit pyrimidine soit ionisé avec du SO_3^- . Cette réaction est décrite comme un échange de bases ou un déplacement de nucléophiles au niveau du carbone du méthylène par lequel l'ion bisulfite déplace la partie thiazole. Le clivage de la thiamine par le bisulfite se produit sur une large gamme de pH, avec un taux maximum se produisant au $\text{pH} \sim 6$. La thiamine peut également être oxydée en

thiochrome en présence d'agents oxydants. La conversion de la thiamine en thiochrome stabilise la structure chimique de la thiamine (Tai *et al.*, 1999).

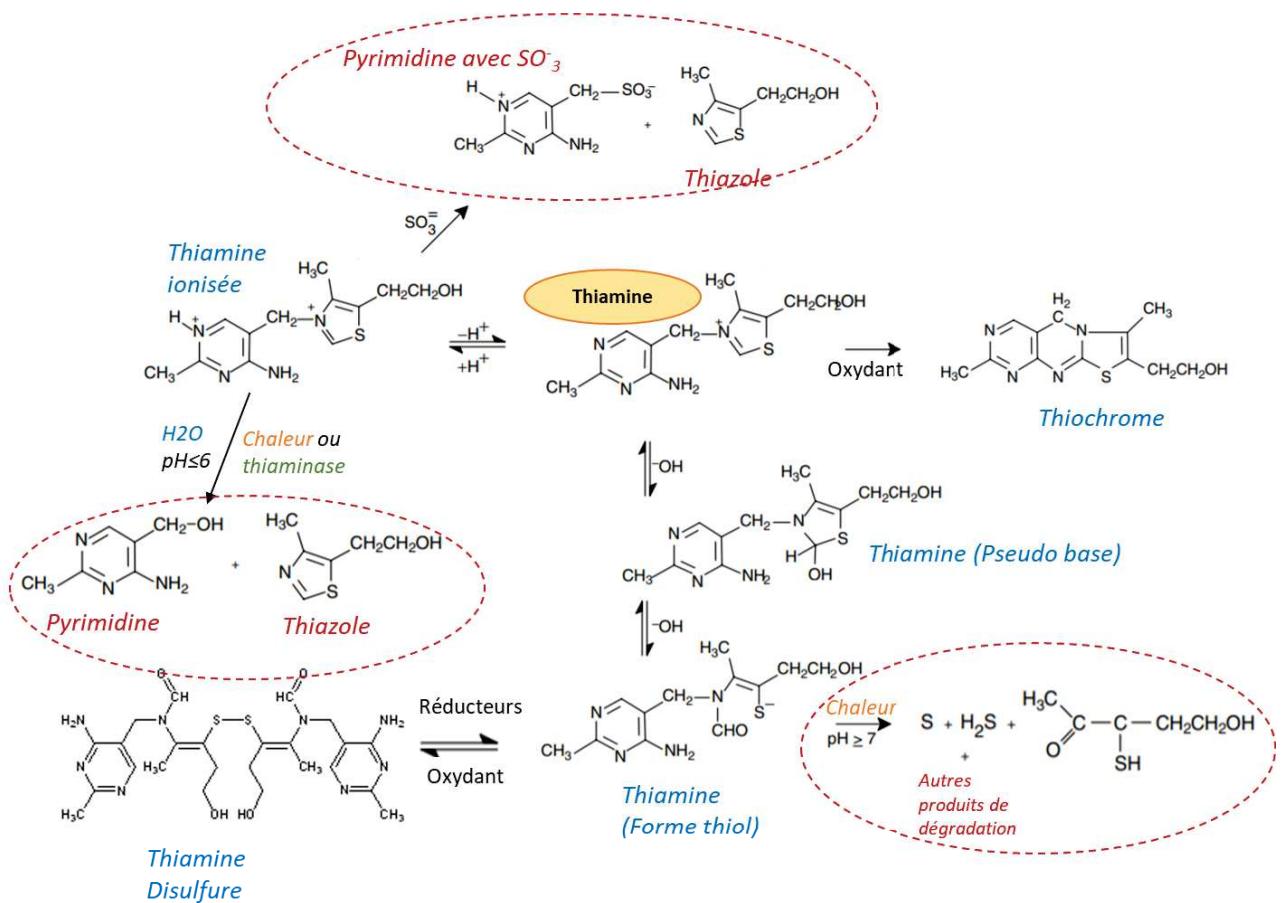


Fig 1. 12 : Schéma d'ionisation et de dégradation de la thiamine

Source : Dwivedi and Arnold, (1973); Gregory, (2008)

Certaines études ayant montré l'impact des procédés de transformation sur la thiamine sont présentées ci-dessous.

Traitement hydrothermique. Edijala, (1980a) a montré que 42-68% de vitamine B1 sont perdus lorsqu'on cuit les graines de niébé entre 40-65 min. Ramaswamy *et al.*, (1990) ont étudié à des températures variant entre 110°C et 150°C la dégradation thermique de la thiamine dans deux systèmes modèles que sont [Thiamine-Eau] (0,1 g/L d'eau) et [Thiamine-Acide ascorbique-Glucose-Glycine] (0,1/1/10/8 ; p/p ; dissous dans 1L d'eau). Les résultats de cette étude ont montré une augmentation de la constante de vitesse de dégradation de la thiamine avec la température. La thiamine a montré une meilleure stabilité thermique dans le système [Thiamine-Acide ascorbique-Glucose-Glycine] comparativement à l'eau pure.

Traitement en milieu basique. L'utilisation d'agents alcalins au cours de la cuisson des graines de niébé peut entraîner des pertes variant entre 56-94% et 63-90% respectivement pour la potasse et le bicarbonate. Tandis qu'au cours de la cuisson sans ajout d'alcalis, on assiste à une perte d'environ 51% (Edijala, 1980b) .

Germination. Plusieurs études ont montré une réduction de la teneur en thiamine au bout des premiers jours de germination de certaines légumineuses telles que le soja, le haricot. Une longue durée de germination entraîne une augmentation de la thiamine, mais avec un taux de recouvrement inférieur à la teneur initiale (Prodanov *et al.*, 1997). Akinlosotu and Akinyele, (1991) ont montré une diminution de la teneur en thiamine (-40%) pendant la germination pendant 96h des graines de niébé.

Friture et autres techniques. Les pertes de thiamine sont plus faibles dans le cas de la friture qu'avec les autres méthodes de transformation. La plus grande perte en thiamine a lieu au cours de la cuisson à l'eau (70%), suivie de la cuisson à la vapeur (40%), du séchage (35%) et de la friture (30%) (Ghidurus *et al.*, 2010). Cela peut être attribué à la nature hydrosoluble de la vitamine B1 qui est diffusée dans l'eau au cours de la cuisson.

1.3.3. Minéraux

1.3.3.1. Absorption, rôle physiologique, manifestation de la carence

Les minéraux essentiels pour le fonctionnement de l'organisme peuvent être divisés en deux grands groupes à savoir les macroéléments (Potassium, Calcium, Magnésium, Sodium, etc.) et les oligo-éléments (Fer, Zinc, Iode, Cuivre, Sélénium, etc.). Ces deux groupes de minéraux sont d'égale importance, mais les oligo-éléments sont nécessaires en plus petites quantités que les macroéléments.

- **Calcium**

Le calcium représente le minéral le plus abondant dans l'organisme. Le corps d'un adulte contient environ 1000-1200 g de calcium représentant 1-2 % du poids corporel. 99 % de cette quantité se trouve dans les os et les dents, où ils sont présents sous forme de phosphate de calcium, leur conférant rigidité et structure. La quantité restante (1%) se trouve dans le sang, les muscles et d'autres tissus (Lanham-New *et al.*, 2019). Le calcium dans les aliments se présente sous forme de sels, ou est associé à d'autres constituants alimentaires sous forme

de complexes d'ions de calcium. La teneur en calcium et la présence d'inhibiteurs dans les aliments déterminent son niveau d'absorption dans l'organisme (Gregory, 2008). Le calcium doit être libéré sous une forme soluble et ionisée, avant de pouvoir être absorbé. Le calcium est nécessaire pour la croissance et le développement du squelette et la rigidité des os qui le compose. L'effet cumulatif de la diminution de l'apport en calcium sur le squelette pendant de nombreuses années contribue à l'apparition des fractures ostéoporotiques avec l'âge. Un apport en calcium insuffisant et prolongé chez les jeunes enfants réduit aussi le taux de croissance du squelette. Cela peut également jouer un rôle dans l'apparition des pathologies liées à l'hypertension, la pré-éclampsie et le cancer du côlon. Le lait et les produits laitiers sont les principales sources alimentaires de calcium. En général, les aliments d'origine végétale ne sont pas des sources très riches en calcium sauf certains légumes tels que le chou. Cependant, en raison des quantités consommées, les aliments d'origine végétale contribuent également de manière significative à l'apport total en calcium. Dans les régions où l'eau est calcaire, la consommation de l'eau du robinet constitue également une source importante de calcium.

A l'échelle mondiale, Kumssa et al., (2015) a estimé l'approvisionnement alimentaire moyen à 684 mg/jour/personne et le risque de la prévalence de carence en calcium à 51% en 2011.

● Magnésium

Le magnésium est le deuxième cation abondant dans l'organisme (environ 25 g). Il est réparti de manière égale entre le squelette (50-60% de la quantité totale) et les tissus musculaires (40-50% de la quantité totale). L'absorption du magnésium se fait dans l'intestin grêle. Le magnésium est essentiel dans de nombreuses réactions cellulaires fondamentales comme le cycle glycolytique convertissant le glucose en pyruvate, la β-oxydation des acides gras et la synthèse des protéines. Le magnésium joue également un rôle important dans le développement et le maintien des os. Les effets pathologiques d'une carence nutritionnelle primaire en magnésium sont peu fréquents chez les nourrissons, mais encore plus rares chez les adultes, à moins qu'un apport relativement faible de magnésium ne s'accompagne d'une diarrhée prolongée ou de pertes urinaires excessives de magnésium. Les conséquences pathologiques précoces de la carence en magnésium sont des défauts neurologiques ou neuromusculaires dont certains reflètent probablement l'influence du magnésium sur le flux de potassium dans les tissus. Une diminution du taux de magnésium sanguin peut produire également des nausées, une faiblesse musculaire, une léthargie, et si la carence se prolonge,

une perte de poids. Les aliments à forte teneur en magnésium comprennent les céréales, les légumineuses, les légumes à feuilles vertes. Cependant, les aliments riches en phytates ainsi qu'en fibres peuvent réduire la biodisponibilité du magnésium. En effet, des apports élevés en fibres alimentaires (40-50 g/jour) réduisent l'absorption du magnésium. Ceci est probablement lié à la fixation du magnésium par les phytates associés aux fibres. Cependant, la consommation de produits riches en phytate et en cellulose augmente l'apport en magnésium (car ils contiennent généralement des concentrations élevées de magnésium), ce qui compense souvent la diminution lors de l'absorption (WHO, 2004).

À l'heure actuelle, la prévalence de la carence en Mg dans la population générale n'est pas bien établie en raison de l'incertitude concernant les apports en Mg nécessaires pour une santé optimale et de la faible fiabilité des méthodes de dosage (absence de biomarqueur idéal) pour évaluer le statut en Mg (Bertinato, 2017).

● Potassium

Le potassium est le principal électrolyte intracellulaire et existe sous forme de cation entièrement soluble dans l'eau. Plus de 90 % du potassium alimentaire est absorbé par le tube digestif. L'importance physiologique du potassium dans l'organisme couvre de nombreux systèmes, notamment cardiovasculaire, respiratoire, digestif, rénal et endocrinien. De plus, le potassium est un cofacteur pour les enzymes impliquées entre autres dans le métabolisme énergétique, la glycogénèse, la croissance et la division cellulaire. L'activité des nerfs et des muscles est affectée par la déplétion en potassium. La supplémentation en potassium peut jouer un rôle dans le traitement de l'insuffisance cardiaque chronique, et une augmentation des apports en potassium peut faire baisser la pression artérielle par le biais d'interactions métaboliques antagonistes avec le sodium, entraînant une augmentation de l'excrétion de sodium, et aussi par un effet vasodilatateur direct. Il a été démontré que l'administration orale de sels de potassium améliore l'équilibre du calcium et du phosphore, réduit la résorption osseuse et augmente le taux de formation osseuse. Les légumineuses, les noix, les fruits secs et les fruits frais, en particulier les bananes et les kiwis, sont riches en potassium. Les principales sources végétales de potassium sont les pommes de terre et les épinards, bien que les céréales et les produits laitiers, qui ont une teneur en potassium plus faible, mais sont consommés en grande quantité, soient également des sources alimentaires importantes.

- **Fer**

Le fer intervient dans un large spectre de fonctions métaboliques. Présent dans l'hémoglobine, le fer est nécessaire au transport de l'oxygène, essentiel à la respiration des cellules. Tout comme pour la myoglobine, dont le fer est nécessaire au stockage de l'oxygène dans les muscles. Le fer est également un composant de diverses enzymes tissulaires, telles que les cytochromes, qui sont essentielles à la production d'énergie, et des enzymes nécessaires au fonctionnement du système immunitaire. La carence en fer a ses manifestations propres, ou peut entraîner l'anémie ferriprive. Les effets de l'anémie ferriprive résultent à la fois d'une réduction de l'hémoglobine circulante et d'une réduction des enzymes contenant du fer et de la myoglobine. Parmi les défauts fonctionnels, citons les perturbations de la thermorégulation normale et l'altération de certaines étapes clés de la réponse immunitaire. Par exemple, il est prouvé que l'anémie ferriprive est associée à une diminution de la fonction des lymphocytes T et B, des macrophages et des neutrophiles. Le fer est largement répandu dans la viande et le poisson, dans lesquels sa biodisponibilité est élevée, ainsi que dans les œufs, les légumineuses, les céréales, mais dans ces deux derniers groupes, la biodisponibilité est souvent très faible en raison de la présence d'inhibiteurs.

- **Zinc**

Le zinc est l'oligo-élément intracellulaire le plus abondant. L'organisme d'un adulte contient environ 2 g de zinc, dont 60% et 30% sont présents respectivement dans les muscles squelettiques et les os, et 4 à 6 % dans la peau. Les manifestations cliniques d'une carence sévère en zinc sont le retard de croissance chez les jeunes enfants, des troubles neuropsychiatriques, une dermatite, une alopecie, une diarrhée, une susceptibilité accrue aux infections et une perte d'appétit. Il a été rapporté que la supplémentation en zinc stimule la croissance et le développement des nourrissons et des jeunes enfants, réduit la morbidité (diarrhées et infections respiratoires), en particulier dans les pays en développement, et peut améliorer l'immunité innée et adaptative. Chez les femmes enceintes, il a été constaté qu'une faible consommation de zinc était associée à un risque environ deux fois plus élevé d'insuffisance pondérale à la naissance et risque accru d'accouchement prématuré. Comme pour le fer, la biodisponibilité du zinc dans les différents aliments est très variable (5 à 50%),

affectée par de nombreux inhibiteurs. La viande, les fruits de mer (en particulier les huîtres) et le foie sont de bonnes sources de zinc biodisponible. Mais dans de nombreuses régions du monde, la majeure partie du zinc est fournie par les céréales. Dans les céréales, la plus grande partie du zinc se trouve dans les germes, près de la partie extérieure du grain, riche en fibres. La biodisponibilité du zinc peut être faible dans les régimes alimentaires à base de graines, en particulier les céréales complètes et les légumineuses, en raison de leurs teneurs élevées en acide phytique, un important inhibiteur de l'absorption du zinc.

Le risque de la prévalence mondiale de la carence en zinc a été estimé en 2011 à 16% par Kumssa et al., (2015).

1.3.3.2. Influence des procédés de transformation sur les teneurs en minéraux

Traitements thermiques. Au cours des traitements thermiques, les minéraux ne sont pas sujets à une dégradation thermique. Finglas and Faulks, (1984) ont montré que lors de la transformation des pommes de terre suivant différents procédés (friture, cuisson à l'eau, cuisson au four), les pertes en minéraux étaient occasionnées lors de la cuisson à l'eau par diffusion dans l'eau de cuisson. Ils ont observé une rétention élevée des minéraux lors de la cuisson au micro-ondes comparativement à la cuisson à l'eau classique ou à l'autoclave. La cuisson à l'eau avec de la potasse ou du bicarbonate de sodium peut entraîner une augmentation de la teneur en minéraux au niveau de la graine cuite (Uzogara et al., 1991).

Mouture. La mouture est une opération pouvant entraîner des contaminations en fer dans les matières premières. Plusieurs études sur les céréales ont montré une augmentation de la teneur en fer (Greffeuille et al., 2011; Icard-Vernière et al., 2013). Cependant, la biodisponibilité du fer de contamination est très faible.

1.3.4. Alpha-galactosides et fibres

1.3.4.1. Structure des alpha-galactosides et biosynthèse

Les alpha-galactosides sont des glucides non réducteurs de faible masse molaire solubles dans l'eau. Ces composés sont des galactosides α ($1 \rightarrow 6$) liés au C6 de la fraction glucose de la molécule de saccharose. On peut distinguer le verbascose, le stachyose, le raffinose, l'ajugose et le cicéritol (Martínez-Villaluenga et al., 2008). Les alpha-galactosides les plus présents dans les légumineuses sont le raffinose, le stachyose et le verbascose (Fig 1.13). Les alpha-

galactosides sont responsables de problèmes de ballonnement et de flatulence chez l'homme (Reddy *et al.*, 1980b), car ils sont indigestes en raison de l'absence de l'alpha-galactosidase dans le tractus intestinal humain. Ils sont fermentés par le microbiote intestinal au niveau du côlon ce qui entraîne la production de gaz : dioxyde de carbone, hydrogène et méthane.

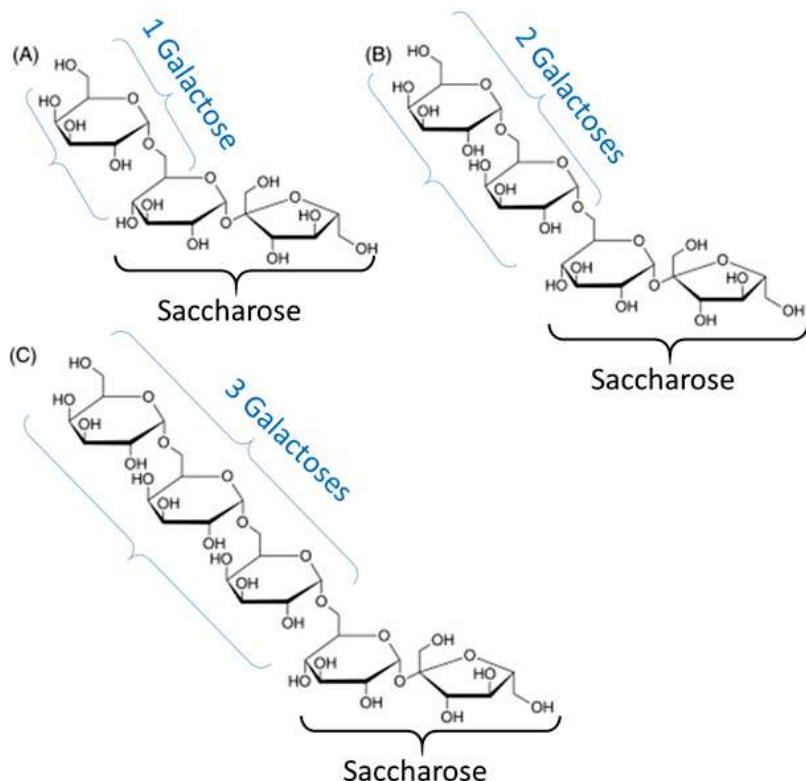


Fig 1. 13 : Structures des alpha-galactosides

Source : Duodu and Apea-Bah, (2017)

(A) Raffinose, (B) Stachyose et (C) Verbascose

La biosynthèse dans les plantes des alpha-galactosides commence avec l'enzyme galactinol synthase, qui forme le galactinol à partir du myo-inositol et du galactose. Le saccharose réceptionne ensuite le galactinol et la raffinose synthase catalyse la réaction pour former le raffinose et le myo-inositol. Le stachyose et le verbascose sont formés de la même manière en utilisant le raffinose (pour le stachyose) ou le stachyose (pour le verbascose), et le galactinol comme substrats, et la stachyose synthase comme enzyme (Martínez-Villaluenga *et al.*, 2008). Le stachyose a été identifié majoritaire dans plusieurs graines de légumineuses telles que la lentille, le soja, le pois (Thirunathan and Manickavasagan, 2018); le fenugrec, le pois chiche, la fève (Njoumi *et al.*, 2019) ainsi que dans le niébé (Coffigniez, 2018).

1.3.4.2. Influence des procédés de transformation sur les alpha-galactosides

Trempage-Cuisson. Après 16h de temps de trempage à 25°C, Njoumi *et al.*, (2019) ont montré une diminution de la teneur totale des alpha-galactosides allant de 10% à 40% dans la lentille, la fève et le pois chiche. Coffigniez *et al.*, (2018a) ont étudié le comportement au cours du trempage à 30 °C, 60 °C et 95 °C du raffinose, stachyose et du verbascose dans les graines entières de niébé ainsi que dans l'eau de trempage. Aucune dégradation thermique de ces trois oligosaccharides n'a été observée au cours de ces trois conditions. À 60 °C et 95 °C, la diffusion des oligosaccharides de la graine vers l'eau de trempage était importante, tandis qu'à 30 °C la diffusion était très limitée. A 30 °C, ils ont observé une hydrolyse enzymatique des alpha-galactosides principalement sur le raffinose et le stachyose.

Fermentation. Egounlety and Aworh, (2003) ont étudié l'impact de la fermentation alcaline (avec du *Rhizopus oligosporus*) de légumineuses sur les alpha-galactosides. Ils ont observé une réduction de 83,9%, et 91,5% du stachyose respectivement pour le soja et le niébé. Cependant, la teneur en raffinose était restée constante.

Germination. La germination peut favoriser la dégradation des oligosaccharides qui sont impliqués dans la flatulence. Cette technique permet l'activation de l'enzyme de dégradation des alpha-galactosides. L'enzyme alpha-galactosidase est naturellement présente dans les légumineuses. L'alpha-galactosidase hydrolyse les galactosides au niveau de la liaison α (1→6), produisant des molécules de saccharose et des résidus de galactose libres. Alani *et al.*, (1990) ont montré que la germination du niébé à 24 et 30 °C entraîne une augmentation de l'activité de l'alpha-galactosidase pendant les 6 aux 12 premières heures et se stabilise par la suite. La teneur en stachyose a diminué de 38 % après 12 heures de germination à 24 °C.

Traitement enzymatique. Devindra and Aruna, (2017) ont purifié l'alpha-galactosidase d'*Aspergillus niger* pour hydrolyser les alpha-galactosides dans le pois d'angole. Ce traitement a entraîné une diminution quasi complète de la teneur en raffinose, en stachyose et en verbascose. Somiari and Balogh, (1993) ont observé une disparition de 93% du raffinose et de 82% du stachyose dans la farine de niébé lorsqu'elle est incubée avec de l'alpha galactosidase à 50°C pendant 2 heures. Dans une autre étude réalisée sur la graine de niébé, Coffigniez *et al.*, (2018b) ont montré que l'activité optimale des alpha-galactosidases se situait à 35 °C avec un pH de 5,8. L'action de l'enzyme sur les alpha-galactosides a montré une phase de latence de 10 h qui serait due au faible pH, à la présence d'inhibiteurs et la biosynthèse des alpha-

galactosides. À la suite de cette phase de latence, ils ont observé une dégradation des alpha-galactosides sans apparition de produits intermédiaires.

Application de différents traitements. Madode *et al.*, (2013) ont montré sur les graines de niébé que la combinaison d'opérations unitaires telles que le décorticage, la cuisson à l'eau, l'acidification ainsi que la fermentation avec certains microorganismes spécifiques peuvent permettre une diminution importante des teneurs en alpha-galactosides.

1.3.5. Phytates

1.3.5.1. Structure et rôle physiologique

Dans les légumineuses et céréales, les phytates existent le plus souvent sous la forme d'inositol hexaphosphate (IP6) (Fig 1.14) (Reddy *et al.*, 1982). Les phytates constituent la réserve de phosphore dans les organes de réserve des plantes.

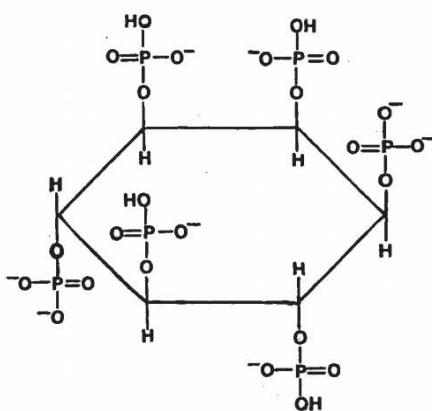


Fig 1. 14 : Structure du myo-inositol 1,2,3,4,5,6 Hexakis Dihydrogen phosphate

Source : Cheryan and Rackis, (1980)

Les phytates sont considérés comme des facteurs antinutritionnels en raison de leur capacité de chélation des minéraux bivalents empêchant leur absorption au niveau intestinal. Mais plusieurs études ont montré également leur rôle anticancéreux (Shamsuddin, 1995) et leur activité en tant qu'antioxydants (Graf *et al.*, 1987). L'effet inhibiteur des phytates sur l'absorption des minéraux dépend non seulement de leur teneur dans l'aliment, mais aussi des rapports molaires phytates-minéraux qui sont utilisés comme des indicateurs de la biodisponibilité adéquate des minéraux en présence des phytates.

1.3.5.2. Facteurs influençant les teneurs en phytates au cours de la transformation

Au cours de la transformation, les phytates peuvent être dégradés par des processus non-enzymatiques et/ou enzymatiques. Les procédés de transformation qui augmentent l'activité des phytases endogènes, enzymes permettant la dégradation des phytates, dans la graine sont le trempage, la germination et la fermentation (Sandberg, 2002). L'activité des phytases varie en fonction du type de matériel végétal. Steiner *et al.*, (2007) ont montré que l'activité de ces enzymes était plus faible dans les graines de légumineuses et l'avoine (262-496 U/kg MS), modérée dans les céréales (sauf l'avoine et le blé) (2323-6016 U/kg MS) et plus élevée dans les co-produits céréaliers (sons de blé et de seigle, 9241-9945 U/kg de MS). Une dégradation non-enzymatique limitée peut également se produire, le plus souvent lors d'un traitement acide ou lorsque l'aliment est soumis à une température élevée. Greiner and Konietzny, (1999) ont montré une réduction d'environ 55% dans le haricot noir après un trempage-cuisson à 60°C à pH 6.

1.4. Etude des mécanismes se produisant au cours des procédés de transformation

1.4.1. Quelques mécanismes des procédés de transformation

Des réactions peuvent se produire au cours des opérations unitaires telles que le stockage, la cuisson, la friture, le séchage. Ces réactions peuvent parfois être défavorables aux aliments en réduisant les teneurs de certains nutriments. Les réactions peuvent être classées en deux grandes catégories (Bimbenet *et al.*, 2002).

- **Réactions biochimiques non enzymatiques**

Quelques-unes de ces réactions sont :

- Brunissement non enzymatique, dites réactions de Maillard. Elles commencent par la formation des molécules associant un sucre réducteur et un acide aminé et se poursuivent par la génération des composés bruns et olfactifs.
- La dénaturation des protéines, qui modifie les structures spatiales de ces macromolécules. Elle peut favoriser la digestibilité des protéines mais aussi entraîner l'inactivation des enzymes.
- L'oxydation des vitamines

- **Réactions catalysées par les enzymes**

- L'hydrolyse de l'amidon, des composés pectiques, des protéines

La notion de réaction peut s'élargir à des phénomènes physico-chimiques comme :

- La gélatinisation de l'amidon
- Les transitions de phases comme la coagulation de macromolécules ou la transition vitreuse.

Au cours des procédés de transformation (cuisson) des transferts de matières et de chaleur peuvent également se produire. La diffusion par exemple est un phénomène au cours duquel de la matière est transportée d'une partie d'un système à un autre (Srikiatden and Roberts, 2007).

1.4.2. Etude de quelques mécanismes via la modélisation

Les mécanismes intervenant au cours des procédés de transformation peuvent être aussi étudiés par des approches de modélisation. La complexité des procédés de fabrication des aliments et des mécanismes qui s'y produisent est l'une des raisons de développement des modèles (Trystram, 2012). Depuis longtemps de nombreux travaux en science des aliments sont consacrés à un tel développement et un grand nombre d'articles traitent de modèle, de manière empirique ou mécaniste.

L'objectif de la modélisation est de permettre la compréhension des caractéristiques d'un objet ou d'un processus complexe (dans un contexte donné), sur la base des connaissances théoriques des phénomènes et des mesures disponibles. Elle présente des avantages qui sont entre autres :

- La capacité d'utiliser une approche multicritère en vue de comprendre différents processus se produisant dans le système étudié.
- La possibilité de faire des extrapolations ou des prédictions sur des domaines expérimentaux non explorés expérimentalement.
- La réduction du nombre d'expériences nécessaires pour analyser un problème particulier permettant ainsi de limiter la durée et le coût d'expérimentation.

Ci-dessous quelques approches de modélisation utilisées pour l'étude des phénomènes de diffusion et réactions.

- **Diffusion**

La diffusion est le processus par lequel un composé soluble donné passe d'une région à concentration relativement élevée à une région à concentration plus faible. Le composé est transféré sous l'influence d'un gradient de concentration. Si le gradient de concentration (C) dépend du temps et de la distance effectuée par le composé, la diffusion peut être représentée par la deuxième loi de Fick reliée à un coefficient de diffusion (D, paramètre important de la diffusion qui est fonction de la concentration du composé étudié et des conditions du milieu) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial^2 x}$$

Plusieurs études ont décrit le phénomène de diffusion au cours du trempage-cuisson des graines de niébé ou dans d'autres légumineuses en utilisant des modèles empiriques (Kaptso *et al.*, 2008). Des modèles permettant de découpler les mécanismes pouvant se produire au cours du procédé (Coffigniez, 2018) sont également utilisés et le coefficient de diffusion est généralement déterminé suivant le flux de matière liée à la loi de Fick :

$$J = -AD\nabla[C]$$

D est le coefficient de diffusion (m^2s^{-1}), A est la surface d'échange de la matrice étudiée (m^2) et [C] la concentration du composé. Dans le cas de l'utilisation des équations empiriques, le coefficient de diffusion peut être déterminé avec une équation analogue à la loi de Fick :

$$k = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2}$$

Où D_{eff} représente le coefficient de diffusion, k la constante de vitesse de la diffusion et r le rayon de la matrice étudiée. La variation de D_{eff} avec la température peut être exprimée suivant une équation de type Arrhenius :

$$D_{eff} = D_0 \exp \left[\frac{E_a}{R(T+273,15)} \right]$$

Avec $D_0 (\text{m}^2\text{s}^{-1})$ le coefficient de diffusion à une température infinie, E_a une constante liée à la diffusion, R la constante des gaz parfaits ($8,31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) et T ($^{\circ}\text{C}$) la température à laquelle le trempage se déroule.

- **Dégradation des composés au cours de la transformation (thermique et/ou enzymatique)**

Une bonne compréhension des cinétiques réactionnelles permet de maximiser la qualité nutritionnelle des aliments. En considérant A un composé donné, l'équation de la réaction peut être formulée comme suit :

$$\frac{d[A]}{dx} = -k[A]^n$$

Où $d[A]/dx$ désigne la vitesse de réaction, k la constante de réaction et n l'ordre de réaction (généralement d'ordre 0 ou 1). Le signe (-) indique que l'on s'intéresse à la disparition du composé A (Bimbenet *et al.*, 2002).

La dégradation isothermique d'un composé peut également être caractérisée par une fonction de type Weibull définie par la fonction :

$$\frac{C(t)}{C_0} = \exp[-b(T)t^{n(T)}]$$

Où C(t) et C₀ sont respectivement les concentrations du composé à un moment t donné et au temps initial (t=0), b(T) et n(T) des coefficients dépendant de la température. De manière générale b(T) est considéré comme un paramètre de vitesse de dégradation et n(T) l'ordre de la réaction (Corradini and Peleg, 2004). Ainsi, si n(T)=1, la réaction est considérée comme étant de premier ordre.

L'influence de la température sur la constante de dégradation est généralement décrite par la loi d'Arrhenius (Peleg, 2019) :

$$k(T) = K_{T_{ref}} \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

Où T est la température en Kelvin, K_{T_{ref}} est la constante de vitesse à une température de référence T_{ref}, E_a est l'énergie d'activation (J) et R la constante universelle des gaz. La dégradation d'un composé est évaluée par le suivi de la concentration en fonction du temps.

1.5. Consommation alimentaire et situation nutritionnelle actuelle de la population adulte en Afrique de l'ouest et au Bénin

Au Bénin, les modèles alimentaires sont spécifiques par région. Cependant, il existe des similarités de consommation alimentaire qui sont liées à trois principaux facteurs que sont : le réaménagement des systèmes de cultures (plus précisément dans le centre et le nord), le

rythme accéléré de l'urbanisation, et la promotion de certaines cultures (maïs et riz) par les ONGs et les projets gouvernementaux (Gandonou *et al.*, 2019). Dans une revue, il a été rapporté que les pourcentages de consommation des différents groupes d'aliments dans les ménages sont les suivants : céréales (98%), racines et tubercules (32%), légumineuses (35%), légumes (95%), fruits (19%), viande (26%), poisson (16%), produits laitiers (20%), huiles (93%), sucres (52%) et condiments-épices (89%) (Amoussa Hounkpatin *et al.*, 2021).

Les quantités journalières moyennes consommées de céréales entières et de légumineuses en Afrique subsaharienne sont très proches des valeurs estimées au Bénin (Global nutrition report, 2020) (Fig 1.15). Cependant, pour la majorité des groupes d'aliments (céréales entières, légumineuses, légumes, fruits et produits laitiers), les valeurs sont inférieures aux objectifs fixés par Willett *et al.*, (2019) pour garantir un régime alimentaire sain et durable afin de diminuer les risques d'apparition des maladies chroniques liées à l'alimentation et protéger l'environnement. Par exemple, au Bénin, la quantité journalière moyenne de légumineuses consommée a été estimée à 37 g tandis que la valeur définie pour assurer un régime sain et durable est de 75 g/jour (50 g pour graines sèches et 25g pour aliments à base de soja).

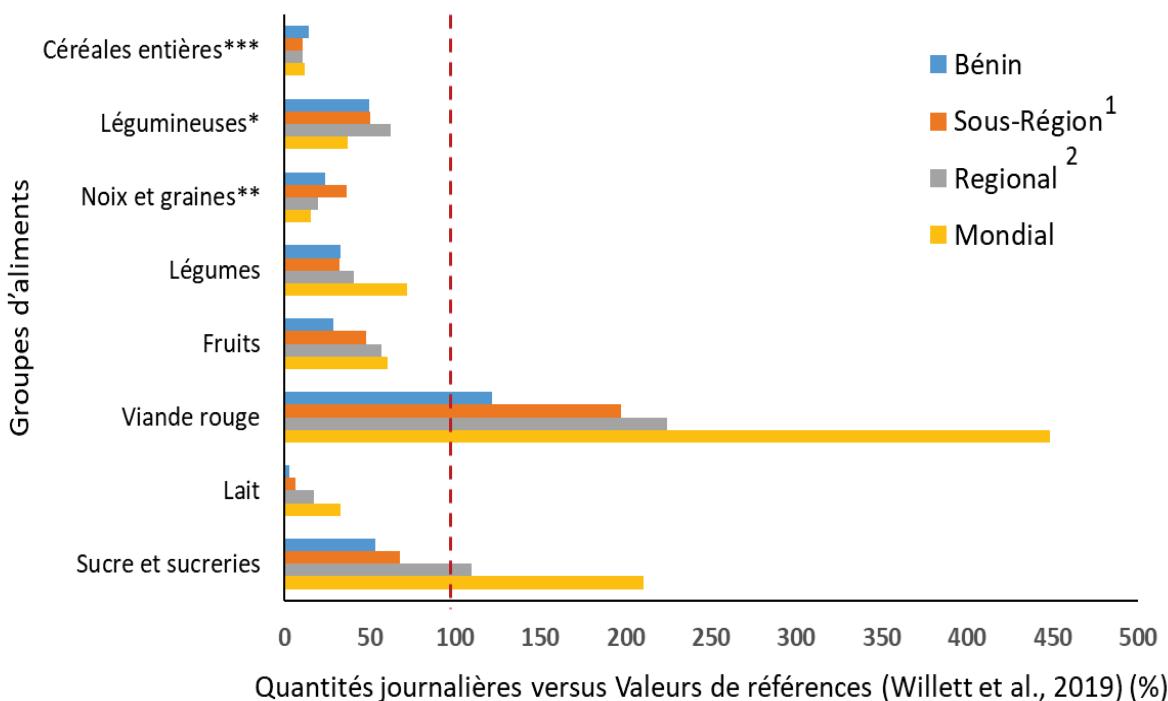


Fig 1. 15 : Comparaison entre consommation alimentaire aux niveaux national, sous régional, régional et mondial (Global nutrition report, 2020) avec les valeurs de références fixées par (Willett *et al.*, 2019).

*Trait rouge en pointillé : Cibles de consommation pour un régime alimentaire sain et durable (Willett *et al.*, 2019).* : Graines sèches et soja; ** : y compris arachide ; *** : Riz, Blé, Maïs et autres ; 1 : Moyenne pondérée de la population de 16 pays d'Afrique de l'ouest, 2 : Moyenne pondérée de la population de 54 pays d'Afrique subsaharienne.*

Au Bénin, environ la moitié de la population est à risque d'insécurité alimentaire (couverture des apports journaliers en énergie et protéines en dessous des valeurs recommandées) (Gandonou *et al.*, 2019). Une revue sur la situation nutritionnelle actuelle au Bénin, indique que la population est confrontée à un double fardeau de malnutrition (c'est-à-dire présence à la fois de la surnutrition et des carences nutritionnelles) avec la sous-alimentation qui est prédominante (Amoussa Hounkpatin *et al.*, 2021). Les maladies chroniques liées à l'alimentation sont également devenues de réels problèmes de santé publique. La figure 1.16 présente les prévalences de certaines maladies liées à l'alimentation.

Anémie. L'anémie survient quand la concentration d'hémoglobine (Hb) et/ou le nombre de globules rouges d'un individu sont inférieurs à la valeur de référence et insuffisants pour répondre à ses besoins physiologiques (Chaparro and Suchdev, 2019). Entre 2010 et 2015, la prévalence de l'anémie a diminué de 5% chez les femmes enceintes et d'environ 10% chez toutes les femmes en âge de procréer. Cependant, les données récentes montrent une prévalence supérieure à la moyenne sous régionale et variant entre 45-55% dans les deux groupes de femmes. Le fer est un composant important de l'hémoglobine. A travers une méta-analyse des données provenant de 23 pays (dont 7 pays en Afrique sub-saharienne), Petry *et al.*, (2016) ont montré que la proportion des cas d'anémie liés à une carence en fer était de 16% chez les femmes en âge de procréer. Pour les 7 pays en Afrique sub-saharienne la proportion était de 28%. Parmi les autres facteurs importants, on peut citer le paludisme ou des maladies liées aux virus et bactéries (Magalhães and Clements, 2011). L'anémie peut être également causée par une carence en folate (anémie mégaloblastique) (Eichner *et al.*, 1971), en vitamine B12, zinc et d'autres micronutriments (Harvey-Leeson *et al.*, 2016).

Diabète. La prévalence du diabète (pathologie liée à un taux de glucose dans le sang $\geq 7\text{mmol/L}$) augmente au fil des années en Afrique sub-saharienne. Au Bénin, la prévalence du diabète est plus élevée chez les hommes que chez les femmes.

Sous-poids, surpoids, obésité. En 2000, la prévalence de sous-poids était estimée à 14% et 11% respectivement pour les hommes et les femmes. Entre 2000 et 2016, la prévalence du sous-poids a diminué chez les adultes de 2,6 à 3,2% (Global nutrition report, 2020). Pendant la même période, la prévalence de l'obésité a connu une évolution croissante avec une estimation en 2016 de 15 % des femmes adultes (âgées de 18 ans et plus) et de 5 % des

hommes adultes et les chiffres sont similaires à la moyenne régionale chez les deux sexes. En 2016, chez les adultes âgés de 18 ans et plus, la prévalence du surpoids a été estimée à 37% et 21% respectivement chez les femmes et les hommes (Global nutrition report, 2020).

Hypertension. L'hypertension se caractérise par une pression artérielle anormalement élevée (la pression artérielle normale correspond à une pression systolique < 120 mm Hg et une pression diastolique < 80 mm Hg) (Singh *et al.*, 2017). Concernant la prévalence de l'hypertension en Afrique subsaharienne, des études indiquent que c'est un problème très répandu, et pouvant atteindre 38 % dans certaines communautés (Guwatudde *et al.*, 2015). Au Bénin, la prévalence a été estimée en moyenne à 27% chez les femmes et les hommes adultes. Les effets de l'hypertension artérielle, si elle n'est pas contrôlée, impliquent de graves complications sur la santé comme les accidents cardiovasculaires par exemple.

Cholestérol. Il est caractérisé par le cholestérol à faible densité (LDL) et le cholestérol à haute densité (HDL). Le LDL transporte le cholestérol du foie vers les tissus périphériques. Des taux élevés de LDL sont nocifs, car ils peuvent s'accumuler sur les parois artérielles et déclencher la formation de plaques d'athérome. Le HDL joue un rôle important dans l'élimination du cholestérol non estérifié des cellules périphériques et assure son acheminement vers le foie (Elshourbagy *et al.*, 2014).

Entre 1980 et 2018, le taux de cholestérol total moyen chez les adultes est resté stable et a été estimé à 4 mmol/L avec un taux élevé de cholestérol LDL (2,7 mmol/L) par rapport au cholestérol HDL (1,1 mmol/L) (NCD-RisC, 2020).

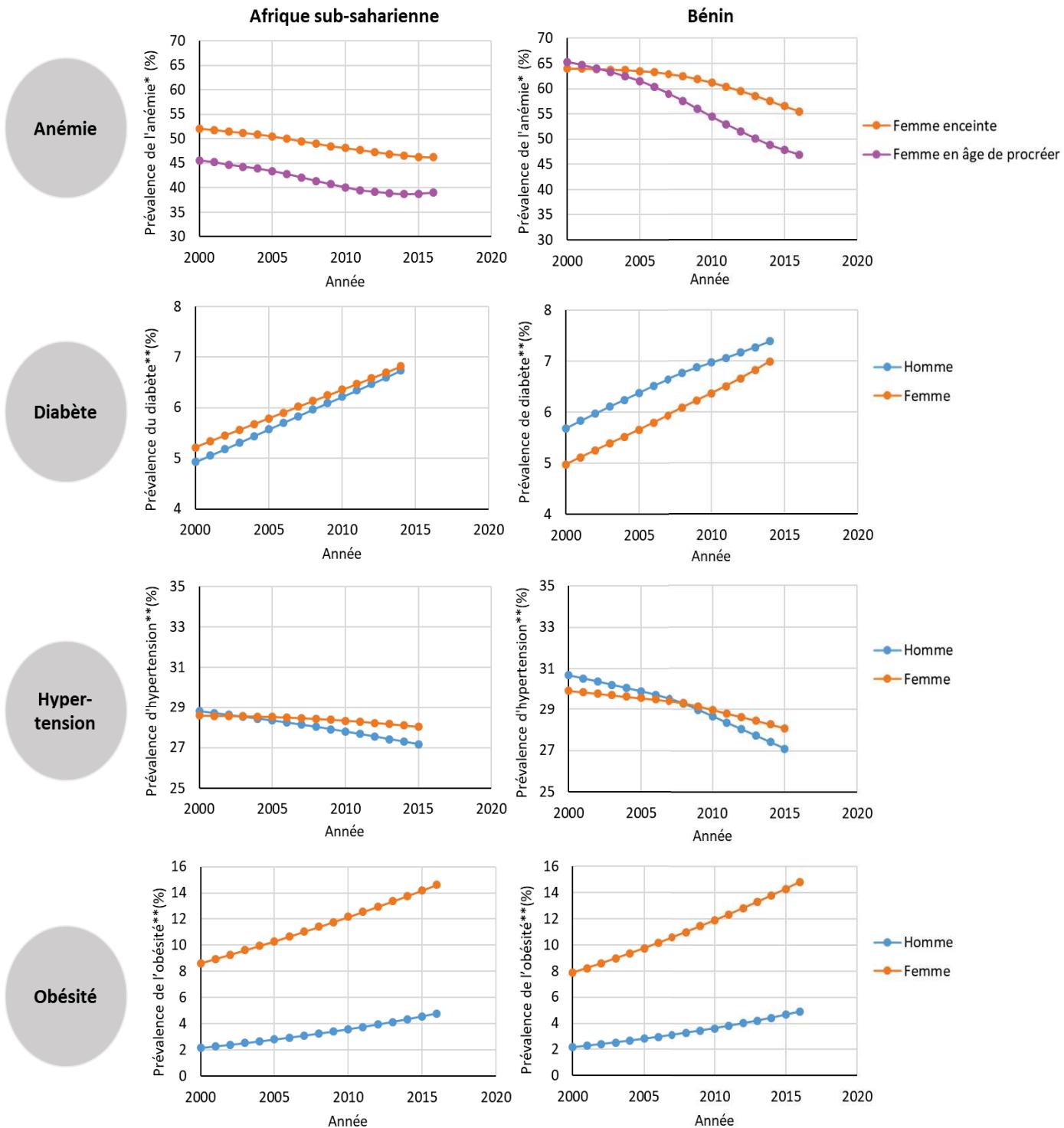


Fig 1. 16 : Prévalence de certaines maladies liées à l'alimentation en Afrique sub-saharienne et au Bénin chez les adultes.

Source : * Données obtenues sur WHO, (2017), ** Données obtenues sur NCD-RisC, (2020)

1.6. Apports journaliers recommandés en folates, thiamine, minéraux chez les adultes

Le tableau 1.10 présente les apports journaliers recommandés (AJR) pour les adultes (ANSES, 2016; FAO and OMS, 2007; WHO, 2004; Codex, 1997).

Thiamine. La thiamine jouant un rôle central dans la production d'énergie, et surtout dans le métabolisme des glucides, les besoins sont principalement liés à l'apport énergétique de ces derniers. Pour des régimes alimentaires pauvres en lipides, et donc riches en glucides, les besoins en thiamine peuvent être un peu plus élevés. Un apport d'au moins 0,2 mg de thiamine/1000 kcal est nécessaire pour prévenir le développement de signes de carence et maintenir une excrétion urinaire normale. Les apports de référence sont calculés sur la base de 0,1 mg/MJ (0,5 mg/1000 kcal) pour les adultes consommant plus de 2000 kcal/jour, avec un minimum requis pour les personnes ayant un faible apport énergétique de 0,8 à 1,0 mg/jour afin de permettre le métabolisme des substrats (Lanham-New *et al.*, 2019).

Folates. L'apport journalier recommandé pour les hommes et les femmes est de 400 µg/jour d'équivalents folates alimentaires. Lorsque l'acide folique (forme synthétique) est ingéré en tant que supplément (non incorporé dans une matrice alimentaire), il est totalement biodisponible (quasiment 100%). Cependant, lorsqu'il est incorporé dans un aliment (fortification dans les matrices céréalières par exemple), son absorption est réduite et sa biodisponibilité est estimée à 85%. Concernant les folates endogènes contenus dans les aliments, leur biodisponibilité est estimée à environ 50% de la teneur initiale de l'aliment (Suior and Bailey, 2000). L'apport journalier recommandé pour les folates est calculé en microgrammes (µg) d'équivalents folates alimentaires sur la base de la biodisponibilité des différentes formes de folate (100% acide folique en supplément et 50% folates alimentaires). Ainsi, 1 µg d'équivalents folates alimentaires correspond à 1 µg de folates alimentaires et 0,5 µg d'acide folique (Saini *et al.*, 2016). Pour réduire le risque d'anomalies de fermeture du tube neural du fœtus chez les femmes enceintes, il est recommandé de prendre quotidiennement 400 µg d'acide folique provenant d'aliments enrichis, de suppléments ou des deux, en plus de la consommation de folates alimentaires provenant d'un régime alimentaire varié (Institute of Medicine (U.S.) *et al.*, 1998).

Calcium. Contrairement à d'autres nutriments, on considère que le besoin en calcium n'est pas lié au maintien de la fonction métabolique du nutriment, mais au maintien d'une réserve

optimale pour assurer l'intégrité des os. Les besoins en calcium varient tout au long de la vie d'un individu, avec des besoins plus importants pendant les périodes de croissance rapide de l'enfance et de l'adolescence, pendant la grossesse et l'allaitement, et à un âge plus avancé (Lanham-New *et al.*, 2019).

Magnésium. L'apport journalier recommandé en magnésium chez les adultes peut varier de 190 à 260 mg/jour. Les apports recommandés pour les femmes sont plus faibles que ceux des hommes. De plus, il n'existe pas de recommandations particulières pour les femmes enceintes. Pour les femmes allaitantes, une augmentation de 50 mg/jour de l'AJR est recommandée.

Potassium. Les besoins en potassium des adultes sont estimés à environ 2 g/jour. En raison des effets antagonistes bénéfiques potentiels vis-à-vis d'apports élevés en sodium via le sel, des apports plus élevés (environ 3,5 g/jour) de potassium sont considérés comme optimaux, bien que des apports chroniques supérieurs à 5,9 g/jour puissent être dangereux pour les personnes dont la fonction rénale est altérée (Lanham-New *et al.*, 2019).

Zinc. L'apport journalier recommandé en zinc est défini sur la base des besoins physiologiques des individus ayant des besoins élevés, tels que les femmes enceintes et allaitantes. Le type de régime alimentaire intervient également dans la définition de l'AJR du zinc en fonction de la biodisponibilité du zinc des aliments qu'ils contiennent

Fer. Tout comme le zinc, l'apport journalier recommandé en fer est estimé en fonction de la biodisponibilité dans la matrice alimentaire. Les AJRs par groupe d'âge et sexe sont donc donnés selon différents niveaux de biodisponibilité alimentaire allant de 5% à 15%.

Tab 1. 10 Apports journaliers recommandés pour les adultes

Groupe	Fibres ^a (g/jour)	Protéines ^b (g/jour)	Thiamine ^c (mg/jour)	Folate ^c (µg/jour)	Fer ^c (mg/jour)	Zinc ^c (mg/jour)	Calcium ^c (mg/jour)	Magnésium ^c (mg/jour)	Potassium ^d (mg/jour)
Hommes									
19– 65 ans	30	54	1,2	400	27,4 ¹	14 ²	1000	260	3500
> 65 ans	30	54	1,2	400	27,4 ¹	14 ²	1300	224	3500
Femmes									
19–65 ans	30	54	1,1	400	58,8 ¹	9,8 ²	1000	220	3500
> 65 ans	30	54	1,1	400	58,8 ¹	9,8 ²	1300	190	3500

^a: (ANSES, 2016), ^b (apport recommandé pour un adulte de 65 Kg) : FAO and OMS, (2007), ^c: FAO-WHO, (2004), ^d : (Codex, 1997)

¹ Adultes âgés de 18 ans et plus, apport journalier recommandé pour une biodisponibilité de 5%.

² Apport journalier recommandé pour une biodisponibilité de 15%.

1.7. Evaluation de l'apport alimentaire et nutritionnel des populations

1.7.1. Méthodes d'évaluation de la consommation alimentaire

Les méthodes d'étude de la consommation alimentaire consistent généralement en des enquêtes mesurant les quantités d'aliments consommées au cours d'une/plusieurs journées ou évaluant le mode de consommation alimentaire au cours des mois précédents. Ces enquêtes fournissent ainsi des données sur les apports en nutriments de l'alimentation ou à partir de catégories spécifiques d'aliments lorsque le questionnaire comporte une estimation des quantités consommées. La conversion des portions alimentaires consommées en nutriments se fait généralement par l'utilisation de tables de composition des aliments ou directement sur la base d'analyses biochimiques réalisées au laboratoire (van Staveren *et al.*, 2012). Les méthodes peuvent être classées en deux catégories : celles qui enregistrent des données au moment de la consommation (méthodes prospectives consistant en des enregistrements pondérés et estimés) et celles qui collectent des données sur le régime alimentaire consommé dans un passé récent ou sur une période plus longue (méthodes rétrospectives : rappel de 24h et enquête de fréquence de consommation alimentaire) (FAO, 2018). Ces études peuvent être réalisées pour développer des politiques nationales, évaluer le risque lié au régime alimentaire sur la santé de la population et servir au secteur privé (entreprises agroalimentaires) pour l'élaboration d'aliments manufacturés (Tab 1.11). Parmi les différentes méthodes existantes, le questionnaire de fréquence de consommation alimentaire (FFQ) est une méthode permettant d'évaluer la consommation alimentaire habituelle de la population étudiée sur une longue durée. Les questionnaires FFQ évaluent l'apport énergétique et/ou nutritionnel en déterminant à quelle fréquence une personne consomme un nombre donné d'aliments qui sont des sources majeures de nutriments. Les questionnaires consistent en une liste ou groupes d'aliments qui contribuent de manière importante à l'apport énergétique et nutritionnel de la population. Les personnes interrogées indiquent combien de fois par jour, semaine, mois ou année elles consomment habituellement ces aliments (Lee and Nieman, 2013). Pour estimer la fréquence moyenne de consommation de la plupart des aliments, les catégories de réponse généralement proposées peuvent varier entre « jamais ou moins d'une fois par mois », « 1-3 fois/mois », « 1 fois/semaine », « 2-4 fois/semaine », « 5-6 fois/semaine », « 1 fois/jour », « 2-3 fois/jour », « 4-5 fois/j » et « >6 fois/j » (Merchant *et al.*, 2005).

Plusieurs études ont été réalisées avec l'utilisation du questionnaire FFQ afin d'identifier les habitudes alimentaires prédominantes des populations en Afrique subsaharienne et d'examiner leur association avec l'obésité (Holmes *et al.*, 2018) ou d'évaluer l'apport en protéines et l'effet du régime sur la prévalence du diabète de type 2 (Coulibaly *et al.*, 2009). Au Bénin, Sossa *et al.*, (2013) ont utilisé cette méthode pour évaluer la fréquence de consommation de différents groupes d'aliments (légumineuses et noix ; viande ; poisson ; lait et produits laitiers ; œufs ; légumes ; fruits et jus de fruits ; sucreries ; boissons gazeuses) et déterminer les associations entre le régime alimentaire et la prévalence des maladies cardiovasculaires. Il faut noter que l'établissement d'une relation entre la consommation alimentaire habituelle et certaines maladies nécessite de collecter en parallèle des échantillons humains (sang, urines) pour effectuer des mesures biologiques telles que la détermination du taux de cholestérol, la glycémie, la pression artérielle, etc. Les différentes études menées en combinaison avec les enquêtes FFQ dépendent des objectifs de la recherche. Par exemple, des discussions de groupe focalisées peuvent être réalisées au sein d'une communauté pour comprendre les tendances de consommation alimentaire entre les différents groupes la constituant. Les discussions de groupes peuvent également servir de base à l'élaboration des questionnaires FFQ (FAO, 2018).

Tab 1. 11 : Quelques objectifs d'évaluation de la consommation alimentaire

Évaluation et suivi des apports en aliments et en nutriments

- Estimer l'adéquation des apports alimentaires d'individus et de groupes
- Assurer l'adéquation de l'approvisionnement alimentaire
- Suivi des tendances de la consommation d'aliments et de nutriments
- Estimer l'exposition aux additifs alimentaires et aux contaminants

Formulation et évaluation des politiques gouvernementales sur la santé et l'agriculture

- Établir des réglementations en matière d'alimentation et de nutrition
- Mettre en place des programmes d'éducation nutritionnelle et de réduction des risques de maladie
- Évaluer le succès et le rapport coût-efficacité des programmes d'éducation nutritionnelle et de réduction des risques de maladie

Tab 1. 11 (Suite) : Quelques objectifs d'évaluation de la consommation alimentaire (

Réalisation de recherches épidémiologiques
<ul style="list-style-type: none"> ● Étudier les relations entre alimentation et santé ● Identifier les groupes à risque de développer des maladies en raison de leur régime alimentaire et/ou de leur apport en nutriments
À des fins commerciales
<ul style="list-style-type: none"> ● Développer des campagnes publicitaires ou de nouveaux produits alimentaires

Source : Lee and Nieman, (2013)

1.7.2. Outils de mesure de la consommation alimentaire et de l'apport nutritionnel

L'une des principales sources d'erreurs dans la mesure de la consommation alimentaire ou de l'estimation de l'apport en nutriments se produit lors de l'évaluation de la taille des portions (Nelson *et al.*, 1996). La mesure de la consommation des aliments (taille de portion) s'effectue par l'utilisation de différents outils. Il s'agit notamment des supports visuels tels que les catalogues photo, des modèles d'aliments ou des emballages alimentaires vides qui incluent des aliments locaux (FAO, 2018). Concernant les catalogues photos, des photographies de tailles de portion différentes sont prises de sorte à être représentative de la gamme de tailles de portions réellement consommées par la population étudiée. Les enquêtés sont ensuite invités à identifier la photographie qui reflète le mieux leur taille de portion de la veille ou habituelle. Une autre méthode consiste à afficher une seule taille de portion moyenne et les individus sont invités à estimer eux-mêmes leur propre portion en tant que fraction, multiple ou pourcentage de la quantité indiquée sur la photo (Nelson *et al.*, 1994). Les modèles d'aliments comprennent les unités ménagères (tasses, cuillères, des bols et verres) ou des objets non-alimentaires de formes géométriques spécifiques (cercle, rectangle) avec des poids similaires à celui des aliments (Johnson, 2002).

Après le recueil des données de consommation alimentaire, une base de données sur la composition des aliments est nécessaire pour convertir les données alimentaires en énergie et en nutriments. Les tables de composition des aliments peuvent contenir des valeurs obtenues par analyses biochimiques et/ou des valeurs non-analytiques calculées à partir de

facteurs de conversion ou estimées à partir d'autres connaissances sur la recette de l'aliment (Schakel *et al.*, 1997).

1.8. Conclusion : Quelle est l'importance du niébé dans l'alimentation au Bénin et sur quels leviers jouer en vue de tirer pleinement profit des bénéfices de cette légumineuse ?

Les informations recueillies à travers cette étude bibliographique montrent l'importance de comprendre les habitudes alimentaires de la population en matière de consommation du niébé ainsi que l'impact des procédés de transformation pour une évaluation précise de leur contribution à la satisfaction des besoins nutritionnels des populations au Bénin. Des travaux antérieurs ont été menés par Madode, (2012) afin d'étudier les opportunités d'amélioration des aliments à base de niébé consommés au Bénin. Cependant, peu d'études sur les modes de consommation du niébé en zones rurales et urbaines ont été réalisées au Bénin. Outre l'aspect concernant la consommation du niébé par la population, la préservation de la qualité nutritionnelle des plats de niébé fréquemment consommés ainsi que la réduction des composés indésirables tels les alpha-galactosides sont des volets importants à explorer.

Les enjeux portés par ce projet pluridisciplinaire sont de 2 types, pouvant représenter deux manières complémentaires de contribuer à l'amélioration de l'état nutritionnel des populations :

- Au niveau sociétal, il semble important d'étudier l'évolution des comportements alimentaires dans le contexte transitionnel urbain, et de comprendre les motivations des consommateurs béninois en termes de consommation de légumineuses (et plus particulièrement de niébé), afin de pouvoir soutenir ou même favoriser cette consommation et les bénéfices santé associés (apports accrus en minéraux et vitamines du groupe B, et en fibres alimentaires bénéfiques pour la prévention des maladies chroniques liées à l'alimentation). Les informations recueillies seront utiles à d'autres acteurs de la chaîne de valeur du niébé, et pourront permettre à terme le développement de nouveaux produits de bonne qualité nutritionnelle, répondant aux attentes des consommateurs urbains.
- Au niveau technologique, il est nécessaire de développer une compréhension plus fine des mécanismes qui régissent le devenir des micronutriments d'intérêt du niébé au

cours de sa transformation (trempage, cuisson hydrothermique/friture), en particulier les vitamines B1 et B9 et les minéraux (fer, zinc, magnésium, calcium et potassium) ainsi que les composés chélateurs associés afin de davantage maîtriser les pertes en micronutriments grâce à l'ajustement de certaines étapes critiques des procédés de transformation.

Deux volets ont été donc étudiés dans cette thèse à savoir l'étude de la consommation des plats traditionnels de niébé et l'étude des procédés traditionnels de fabrication des beignets (fréquemment consommés).

Chapitre 2 : Matériel et Méthodes

2.1. Matériel Végétal

Trois lots de graines de niébé de la variété Atchawé Tola (variété blanche) ont été utilisés pour la réalisation des différentes phases de cette étude (Tab 2.1). Les graines ont été produites dans le département de l’Ouémé, au sud du Bénin. Après chaque récolte, les graines ont été triées et nettoyées puis stockées à -20°C pendant une à deux semaines. Ensuite, durant chacune de ces phases, les graines ont été conservées en chambre froide à 4°C avec des durées de stockage variant entre 1 à 2 ans.

Tab 2. 1 : Récapitulatif des lots de graines de niébé utilisés par type d’activité

Année	Activité
2017-2018	<ul style="list-style-type: none"> - Caractérisation de la valeur nutritionnelle des graines - Caractérisation du procédé traditionnel de production du ragoût et des beignets
2019-2020	<ul style="list-style-type: none"> - Etude du procédé de production des beignets en laboratoire (Effet de l’étape de battage sur les teneurs en folates)
2020-2021	<ul style="list-style-type: none"> - Réalisation de bilans matière au cours de la production des beignets de niébé - Etude du procédé de production des beignets en laboratoire (Cinétiques de trempage des gritz, plan d’expériences sur l’effet de l’étape de friture)

2.2. Protocole d’étude

2.2.1. Enquête de consommation alimentaire

Une enquête transversale par questionnaire de fréquence de consommation alimentaire (FFQ) (annexe 1) a été conduite. Le protocole de cette étude a été rédigé par zone d’étude (urbaine et rurale) et soumis au comité national d’éthique pour la recherche en santé du Bénin (CNERS).

Le questionnaire d’enquête a été construit suivant les axes que sont :

- **Caractéristiques socio-économiques des enquêtés** : cette partie comprend des questions permettant d’évaluer le niveau socio-économique du ménage, et de caractériser les personnes enquêtées et leur chef de famille (âge, sexe, niveau d’éducation, secteur professionnel, etc.).

- **Consommation des légumineuses** : ce volet du questionnaire regroupe des questions portant sur la fréquence de la consommation des légumineuses et des plats à base de niébé par les hommes et les femmes adultes.
- **Consommation des plats de niébé** : Ici, des questions visant à estimer les quantités consommées pour chaque type de plat à l'aide d'un « catalogue photo » ont été posées. Le catalogue présente des photos de portions de différentes tailles pour les neufs plats à base de niébé consommés dans le sud du Bénin.

Les informations ont été collectées à l'aide d'un formulaire électronique (construit avec la plateforme SurveyCTO), sur des tablettes tactiles, de manière à faciliter la saisie et le traitement des données.

2.2.1.1. Choix des zones d'études

L'objectif de l'étude étant de caractériser les modes de consommation du niébé dans deux contextes, urbain et rural, la ville de Cotonou (la plus grande agglomération urbaine du Bénin) a été sélectionnée comme zone urbaine. Pour ce qui est de la zone rurale, les communes d'Adjohoun et d'Allada ont été retenues. En effet, l'enquête en milieu urbain réalisée en 2017 à Cotonou dans le cadre du projet ICOWPEA avait révélé que la majorité des enquêtés de Cotonou étaient originaires de ces deux communes. Les communes de Adjohoun et de Allada sont respectivement des zones de forte et faible production du niébé. L'objectif était de vérifier l'influence du niveau de production du niébé dans les zones rurales sur sa consommation. Les trois zones d'études sont localisées au sud du pays (Fig 2.1).

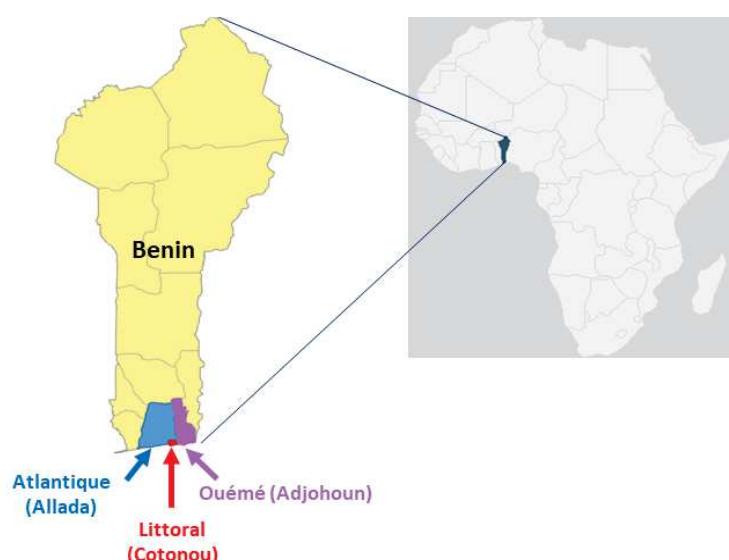


Fig 2. 1 : Localisation géographique des zones étudiées

2.2.1.2. Échantillonnage de la population enquêtée

Il n'existe pas de formule permettant le calcul de la taille de l'échantillon nécessaire à la réalisation d'enquêtes de consommation par questionnaire de fréquence. Pour ce faire, une taille d'échantillon similaire à celle d'autres études du même type (fréquence de consommation) (Mchiza *et al.*, 2015) a été choisie.

Zone urbaine : Compte-tenu de la configuration de la ville de Cotonou (13 arrondissements), et de la stratification par sexe (homme/femme), nous avons choisi un échantillon de 624 individus, dont 312 femmes, et 312 hommes adultes (19 à 65 ans, correspondant à la classe d'âge adulte utilisée par la FAO et l'OMS pour la définition des apports journaliers recommandés FAO-OMS, 2004), répartis en nombre égal dans les 13 arrondissements de la ville pour garantir une couverture géographique homogène.

Zones rurales : A Adjohoun et Allada, nous avons choisi d'enquêter une population dont la taille serait approximativement similaire à celle de la population de Cotonou. Ainsi, 576 adultes ont été enquêtés au total (288 par zone rurale).

Dans les trois zones étudiées, un échantillonnage probabiliste à deux degrés a été réalisé, en considérant les quartiers ou les villages comme des grappes :

- Au premier degré : Pour chacun des arrondissements de chaque ville, 2 à 3 quartiers ou villages ont été tirés au sort aléatoirement en se basant sur la liste fournie par INSAE, (2013).
- Au deuxième degré : Dans chacun des quartiers ou villages précédemment tirés au sort, un nombre égal de femmes et hommes a été choisi de manière aléatoire, en utilisant la méthode dite du « tournage de stylo ».

Une synthèse de la méthode d'échantillonnage est présentée au niveau du tableau 2.2.

Tab 2. 2 : Plan d'échantillonnage à deux degrés des enquêtés aux FFQs

Premier degré	<ul style="list-style-type: none"> ● Cotonou : 3 quartiers dans chacun des 13 arrondissements → 39 quartiers ● Adjohoun : 2-3 villages dans chacun des 8 arrondissements → 24 Villages ● Allada : 3 villages dans chacun des 12 arrondissements → 36 villages
Second degré	<ul style="list-style-type: none"> ● Cotonou : 8 femmes + 8 hommes par grappe → 624 individus ● Adjohoun : 6 femmes + 6 hommes → 288 individus ● Allada : 4 femmes + 4 hommes → 288 individus

2.2.1.3. Elaboration du catalogue photo des neuf plats traditionnels pour l'estimation des tailles de portions

Le catalogue photo présentait quatre photos de taille de portions différentes des plats de niébé identifiés dans le cadre de l'étude. Cet outil a permis aux enquêtés d'identifier correctement le plat sur lequel des questions lui seront posées (car les noms des plats peuvent varier d'une zone à l'autre) et d'estimer la quantité habituellement consommée au cours des sept jours précédent l'enquête. Nous avons dans un premier temps, identifié des productrices dans chacun des 13 arrondissements de la ville de Cotonou et sélectionné une productrice par arrondissement. Ensuite, on a recensé les sommes d'argent fréquemment dépensées par les consommateurs adultes (19 à 65 ans) pour l'achat du plat. Quatre prix d'achat les plus demandés ont été choisis. La moyenne des tailles de portions correspondantes à chaque prix a ensuite été calculée et utilisée pour réaliser la photo pour chaque taille de portion.

Une même assiette a été utilisée pour tous les plats avec un couvert servant d'échelle qui a été placé à côté de l'assiette. Les photos ont été prises sur un fond neutre en gardant toujours la même distance et le même angle entre l'appareil photo et l'assiette.

2.2.1.4. Groupes de discussion focalisée

- **Objectifs des groupes de discussion**

Des groupes de discussion focalisée ont été réalisés en complément aux enquêtes FFQs afin de contribuer à répondre aux hypothèses de recherche qui sont :

- La consommation de plats à base de niébé est plus faible en milieu urbain qu'en milieu rural, en termes de quantités consommées et/ou de fréquence de consommation, et les accompagnements sont différents.
- Les procédés traditionnels de transformation sont peu modifiés en milieu rural comparativement au milieu urbain.
- Les formes de transformation de niébé les plus consommées peuvent différer d'un milieu à un autre en fonction de leurs caractéristiques socio-culturelles.
- On observe une évolution des formes et fréquences de consommation au cours des trois dernières générations (grands-parents, parents, enfants) en zone urbaine (Cotonou)

Les entretiens ont été réalisés à l'aide d'un guide d'entretien (annexe 2) avec pour objectifs de :

- Evaluer l'évolution des fréquences de consommations, des quantités de plats de niébé consommées et les formes de transformation sur trois générations différentes (habitudes de la personne enquêtée, de ses parents et de ses grands-parents);
- Recueillir les perceptions des populations sur les modes et fréquences de consommation du niébé en milieux urbain et rural ;
- Identifier les facteurs impactant la consommation du niébé
- Recenser les attentes des consommateurs par rapport aux plats de niébé.

• Échantillonnage des participants aux groupes de discussion

Les discussions ont été réalisées avec 4 groupes différents de participants : un groupe de femmes âgées de 19 à 30 ans, un groupe de femmes d'âge allant de 55 à 66 ans, un groupe d'hommes âgés de 19 à 30 ans et un groupe d'hommes d'âge allant de 55 à 66 ans. 7 à 13 personnes ont été recrutées pour participer à chaque groupe de discussion. Au total 16 discussions de groupe ont été réalisées : 8 à Cotonou, 4 à Adjohoun et 4 à Allada.

La sélection des participants a été effectuée avec l'aide des chefs de quartiers ou de villages.

2.2.1.5. Considérations éthiques

Les autorités locales ont été informées de l'enquête et les enquêteurs étaient munis d'une lettre officielle de facilitation qui a permis d'informer les populations de la tenue des enquêtes FFQs et d'atténuer l'éventuelle méfiance que certains répondants pourraient manifester lors du passage des enquêteurs. Les personnes sélectionnées ont été informées des objectifs de l'étude et ont donné leur accord à travers la signature d'une note de consentement. Pour les enquêtés qui n'étaient pas disponibles pour répondre au questionnaire, un rendez-vous a été convenu ultérieurement avec l'enquêteur, en fonction de leur disponibilité. L'anonymat des enquêtés a été garanti et cela leur a été attesté sur la note de consentement.

Les enquêtes ont été approuvées par le comité national d'éthique pour la recherche en santé (CNERS) (annexe 3).

2.2.2. Échantillonnage des plats traditionnels de niébé

Au total, neuf plats de niébé ont été retenus parmi les 18 plats recensés par Madode et al., (2011). Ces neuf plats traditionnels de niébé sont connus par la population des zones d'étude et certains facilement disponibles. Les matières premières n'ont pas été fournies aux productrices. Au total, 27 échantillons ont été collectés à Cotonou, Abomey-Calavi et Pahou

(Tab 2.3). Pour chacun de ces plats, les échantillons ont été collectés chez 3 productrices différentes. Après chaque prélèvement, les échantillons ont été stockés à -20 °C jusqu'aux analyses.

Tab 2. 3 : Liste des plats traditionnels de niébé auprès des productrices

plat	Productrice	Localisation
Abobo	1	Aïbatin
	2	Senandé
	3	Ayelawadjè
Ataclè	1	Tokpa
	2	Marché Pahou
	3	Marché Pahou
Ata doco	1	Zongo
	2	Akpakpa le Bélier
	3	Ayelawadjè
Abla	1	Tokpa
	2	Marché Pahou
	3	Marché Pahou
Atassi	1	Houeyaho
	2	Djèdjèlayé
	3	Tokpa
Ata	1	Tokpa
	2	Sacré-Coeur (avant l'église)
	3	Fidjrossè Adjaha
Adowè	1	Aïbatin
	2	Houéyaho (au niveau de l'échangeur)
	3	Port de pêche
Djongoli	1	Akpakpa Carrefour PTT
	2	Fidjrossè Adjaha
	3	Sodjatimè (devant Pharmacie la Béninoise)
Vêyi	1	Houéyaho
	2	Sènandé
	3	Sacré-coeur

2.2.3. Suivis de production des beignets de niébé et échantillonnage

2.2.3.1. Echantillonnage des produits intermédiaires et finaux au cours de la production du ragout et de Beignets de niébé

Une étude préliminaire de caractérisation des procédés traditionnels de production des beignets de niébé a été réalisée avant le démarrage de cette thèse. De cette étude, des variantes de production des beignets Ata et Ata - doco ont été identifiées. Pour le Ata, il s'agit des variantes liées au mode de décorticage, (i) par trempage et trituration manuelle ou (ii) par concassage. Quant au beignet Ata-doco, trois variantes ont été recensées : (i) concassage des graines suivi de mouture sans ajout de bicarbonate au battage, (ii) mouture directe avec ajout de bicarbonate de sodium au battage, et (iii) mouture directe sans ajout de bicarbonate de sodium au battage.

Des échantillons ont été collectés aux principales étapes de chaque variante de production. Chaque échantillon a été prélevé en double : 20g dans un sachet opaque pour le dosage des vitamines B1 et B9 et 50g dans un pot pour la détermination de la composition globale, des minéraux, des phytates et alpha-galactosides.

2.2.3.2. Réalisation de bilan matière au cours de la production des beignets Ata

Cette étude a été réalisée auprès de 3 productrices des beignets Ata. L'objectif était de suivre les pertes de matières ainsi que l'évolution de la teneur en folates et alpha-galactosides à toutes les étapes du procédé traditionnel de production en tenant compte du rendement massique après chaque étape du procédé. La variante de production « décorticage par concassage » a été sélectionnée pour cette étude. La matière première (environ 2 kg) a été fournie à chaque productrice. La quantité initiale de matière première, les quantités des produits intermédiaires (après chaque étape de production), ainsi que celles des beignets ont été pesées. Les masses des récipients et ustensiles utilisés au cours du procédé ont été également notées. Des prélèvements ont été effectués à toutes les étapes de production. Les masses des échantillons prélevés ont été relevées afin de les prendre en compte dans le bilan massique. Suivant le diagramme de production, huit opérations unitaires ont été identifiées pour la réalisation du bilan matière (Fig 2.2). Au cours du suivi du procédé, les paramètres tels que la température et la durée de réalisation du trempage, du battage, et de la friture ont été enregistrés.

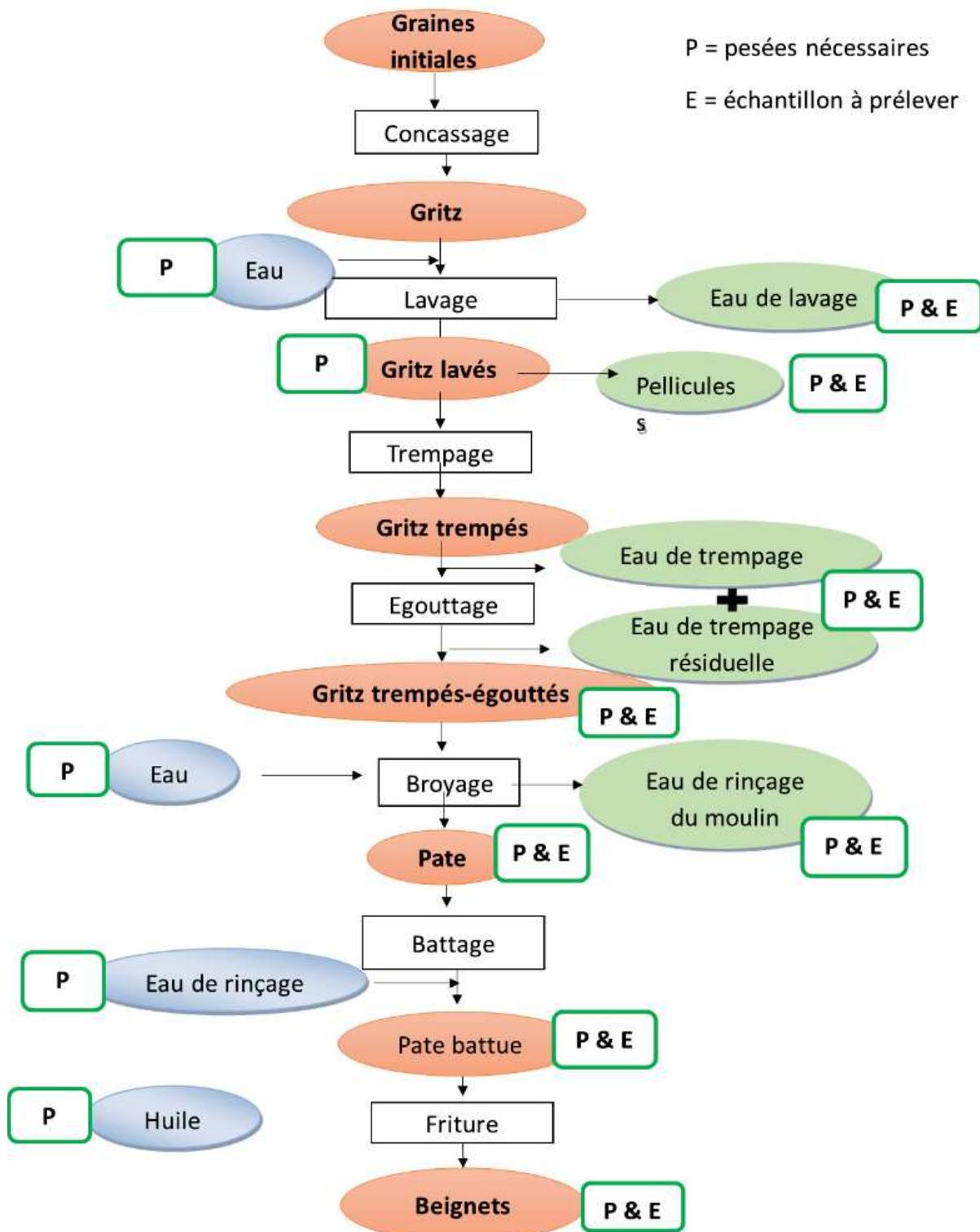


Fig 2. 2 : Diagramme de production des beignets Ata avec identification des étapes de prélèvement au cours du bilan matière

2.2.4. Production des beignets de niébé en conditions contrôlées

2.2.4.1. Préparation des gritz de niébé et cinétique de trempage des gritz pour la préparation des beignets Ata

Concassage. Les gritz de niébé ont été obtenus par concassage à l'aide d'un moulin à meules commercial (Modèle 150, puissance 2200W, tension 220V, vitesse 1400 tr/min, Marque Taishi, Chine) (Fig 2.3). La distance de sortie de l'axe du moulin a été réglée à 17,3 mm (distance mesurée à l'aide d'un pied à coulisse) afin d'obtenir des particules grossières.

Lavage. Les gritz obtenus après concassage ont ensuite été lavés avec un ratio graines/eau de 1/5 afin d'éliminer les particules fines ainsi que les enveloppes. Après 5-6 cycles de lavage, les gritz ont été égouttés pendant 5 minutes.

Cinétique de trempage. Le trempage des gritz lavés a été effectué à l'aide d'un bain-marie (Grant OLS Aqua Pro) doté d'un agitateur. Environ 80g de gritz lavés ont été mis dans un bécher contenant 320 ml d'eau déminéralisée (ratio graine/eau ; 1/4 ; g/ml), préalablement ramenée à la température de trempage. Les essais ont été réalisés pendant 10 min, 20 min, 30 min et 60 min respectivement à 5°C, 15°C, 30°C, 45°C et 60°C. Après chaque trempage, l'eau résiduelle a été éliminée par égouttage pendant 5 min à l'aide d'un chinois.



Fig 2. 3 : Moulin à meules et obtention des gritz de niébé

2.2.4.2. Fabrication des beignets de Ata et Ata-doco

- **Définition du plan d'expérience**

La conception du plan d'expérience de friture des beignets de niébé a été effectuée à l'aide du logiciel Statgraphics Centurion 16.2 (FranceStat, Neuilly, France). Un plan de criblage à niveaux mixtes étudiant 4 facteurs (Tab 2.4) sur 16 essais incluant 4 points au centre a été construit pour la fabrication de chaque type de beignets. L'ordre des expériences a été randomisé.

Tab 2. 4 : Facteurs et niveaux d'optimisation de l'étape de friture des beignets Ata et Ata-doco

Facteurs	Niveau inférieur	Points centraux	Niveau supérieur
Granulométrie pâte	Fine (19 mm)	-	Grossière (18,5 mm)
Masse des beignets (g)	22	36	50
Température de friture (°C)	150	165	180
Durée de friture (minutes)	3	5	7

- ***Préparation des pâtes pour la production des beignets Ata.***

Pour les beignets Ata, les graines ont été préalablement concassées en gritz comme décrit précédemment. Les gritz ont ensuite été lavés 5 fois. De manière plus explicite, après trituration des gritz dans de l'eau, les enveloppes et les hiles (points noirs) sont récupérés à l'aide d'une passoire et l'eau est réutilisée jusqu'à l'obtention de gritz propres. Après le lavage, les graines ont été trempées pendant 30 min à la température ambiante, et égouttées pendant 5 min pour l'élimination de l'eau résiduelle. Les graines égouttées et trempées ont été séparées en deux batchs différents pour réaliser les moutures de granulométrie fine (distance de sortie de l'axe du moulin : 19 mm) et grossière (distance de sortie de l'axe du moulin : 18,5 mm) (Tab 1.15). Les pâtes obtenues ont été réparties dans des sacs par lot de 300 g puis stockées à -30°C jusqu'à utilisation pour la production des beignets.

- ***Préparation des pâtes pour la production des beignets Ata-doco***

Concernant les beignets Ata-doco, les graines entières de niébé ont été directement broyées par voie sèche avec les mêmes distances de sortie de l'axe du moulin (18,5 mm et 19 mm) pour obtenir une granulométrie fine et grossière. Les farines ont été conservées à -30°C jusqu'à la réalisation des essais de fritures.

- ***Production des beignets Ata et Ata-doco***

Nous avons choisi d'utiliser des pâtes ayant des teneurs en matières sèches finales (TMS_f) de 30% pour Ata et de 40% pour Ata-doco. Ces valeurs permettent d'obtenir une consistance épaisse susceptible de former des boules au cours de la friture. Elles ont été définies sur la base des teneurs en matières sèches des pâtes collectées chez les productrices et de quelques expériences préliminaires en laboratoire. Les teneurs en matière sèche initiale (TMS_i) des pâtes ont été déterminées et un ajustement de la consistance a été effectué afin d'obtenir

des valeurs de 30% pour Ata et 40% pour Ata-doco. L'ajustement a été réalisé avec la formule ci-dessous :

$$Wa = \frac{Qp (TMSi - TMSf)}{TMSf}$$

Avec :

Wa la masse d'eau nécessaire pour atteindre la teneur en eau visée,

Qp la quantité de pâte prélevée (g),

TMSi teneur en matière sèche initiale en %

TMSf teneur en matière sèche finale (désirée) en %

Après l'ajustement de la TMS, un battage de 15 min (vitesse de battage 4) a été réalisé à l'aide d'un robot pâtissier commercial (Moulinex, QA405HB1, Chine). La quantité de pâte à battre a été fixée à environ 400 g par essai. La friture de la pâte battue a été réalisée à l'aide d'une friteuse commerciale (SEB, Filtra One FF162100, Ecully France) avec une capacité volumique de 2,1 L et une puissance de 1900 W. La friteuse a été placée sur une balance afin de noter la masse exacte de chaque pâton (Fig 2.4 A). Le panier de la friteuse a été compartimenté avec un set de grilles de sorte à mettre six pâtons de niébé par essai (Fig 2.4 B). Cela a également permis de facilement identifier les beignets pour relever leur masse exacte en fin de friture. Les températures de l'huile et au cœur des beignets ont été enregistrées à l'aide d'une centrale d'acquisition thermique (Almemo ® 2690 Ahlborn, Holzkirchen, Allemagne) (Fig 2.4 C).



(A) Friteuse posée sur une balance



(B) Panier de la friteuse compartimenté en 6



(C) Friture des beignets avec enregistrement température



(D) Egouttage des beignets après friture (1 min)

Fig 2. 4 : Dispositif de friture des beignets Ata et Ata-doco

Après chaque fournée, les beignets ont été égouttés pendant 1 min (Fig 2.4 D) puis laissés refroidir pendant 5 min sur un plateau. Les essais de friture des deux types de beignets ont été réalisés en utilisant les mêmes modalités (Tab 2. 5).

Tab 2. 5 : Plan d'expérience de friture des beignets Ata et Ata-doco

Code	Masse pâton	sortie axe	température	Durée
AT1	22	Fin	150	3
AT2	36	Fin	165	5
AT3	36	Fin	165	5
AT4	36	Gros	165	5
AT5	50	Gros	150	7
AT6	50	Fin	180	7
AT7	36	Fin	150	7
AT8	36	Gros	150	3
AT9	50	Fin	150	3
AT10	22	Gros	180	3
AT11	36	Gros	180	7
AT12	36	Gros	165	5
AT13	36	Fin	180	3
AT14	50	Gros	180	3
AT15	22	Fin	180	7
AT16	22	Gros	150	7
AD1	22	Fin	150	3
AD2	36	Fin	165	5
AD3	36	Fin	165	5
AD4	36	Gros	165	5
AD5	50	Gros	150	7
AD6	50	Fin	180	7
AD7	36	Fin	150	7
AD8	36	Gros	150	3
AD9	50	Fin	150	3
AD10	22	Gros	180	3
AD11	36	Gros	180	7
AD12	36	Gros	165	5
AD13	36	Fin	180	3
AD14	50	Gros	180	3
AD15	22	Fin	180	7
AD16	22	Gros	150	7

Après refroidissement, les masses des beignets après friture ont été mesurées. Les dimensions des beignets (épaisseur, longueur et largeur) ont ensuite été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse. Sur les 6 beignets obtenus par essai de friture, 3 ont été gardés en entier et pour les 3 restants, la croûte et la mie ont été séparées manuellement, l'objectif étant d'étudier la distribution des composés (lipides, thiamine, alpha-galactosides) dans les différentes parties

des beignets. Les échantillons de beignets, de mie et de croûte ont ensuite été collectés (Fig 2.5). Les dosages de lipides et de la thiamine ont été réalisés sur les échantillons.

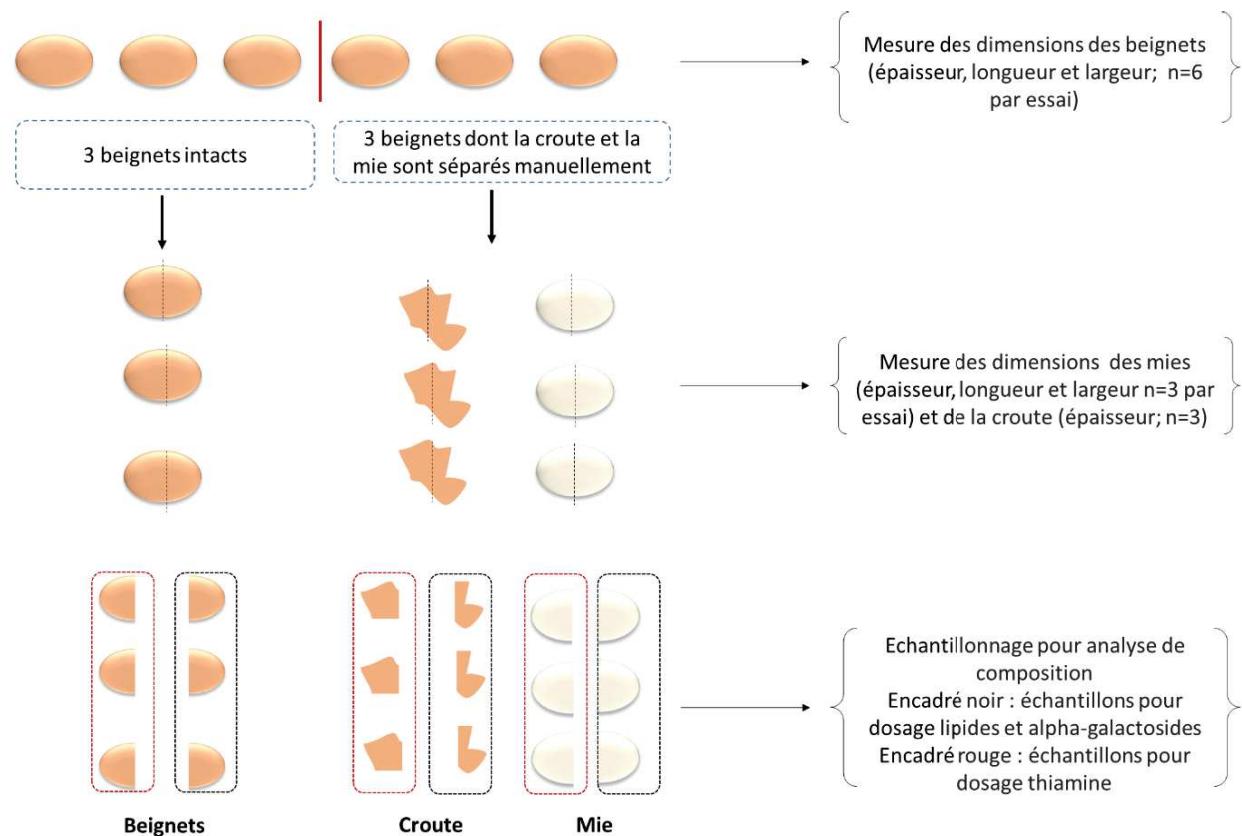


Fig 2. 5 : Procédure d'échantillonnage des beignets préparés en laboratoire pour analyse de composition

2.3. Méthodes d'analyses de laboratoire

2.3.1. Préparation des échantillons avant analyses de composition nutritionnelle

- Echantillons pour le dosage des folates et de la thiamine

Pour le dosage des vitamines, tous les échantillons collectés sur le terrain, les échantillons expérimentaux ainsi que la matière première ont été broyés sous azote liquide à l'aide d'un cryo-broyeur (MM 400, Retsch, Éragny, France). Cette technique permet d'éviter l'altération de l'échantillon par la chaleur générée au cours du broyage. Brièvement, les échantillons sont maintenus congelés, coupés en morceaux à l'aide d'un couteau, insérés dans des bols en acier inoxydable qui sont ensuite refermés et immergés dans de l'azote liquide (à -196°C).

Une fois que la température des bols est basse, les échantillons ont été cryo-broyés et conservés à -20°C jusqu'aux analyses.

- **Échantillons pour autres analyses**

Tous les plats traditionnels ainsi que les échantillons expérimentaux utilisés pour la détermination de la composition globale, des teneurs en minéraux, des phytates et des alpha-galactosides ont été lyophilisés, broyés (broyeur IKA 20, Labortechnik, Staufen, Germany) et conservés à 4°C jusqu'aux analyses.

Les graines de niébé ont été broyées avec le broyeur IKA et tamisées à l'aide d'un tamis de 0,5 mm. Les particules ayant une taille supérieure à 0,5 mm ont été broyées à nouveau et le produit obtenu a été ajouté à la farine générée après tamisage. Les farines de niébé ont été conservées à 4°C pour les différentes analyses biochimiques.

2.3.2. Composition globale

- **Détermination de la teneur matière sèche**

Environ 5 grammes d'échantillon ont été pesés puis placés en étuve à 105°C pendant 24 heures, jusqu'à masse constante. Les masses après séchage ont été pesées afin de connaître la teneur en matière sèche (exprimée en pourcentage) de chaque échantillon. Trois essais ont été réalisés par échantillon.

- **Dosage des protéines par méthode de Kjeldahl**

Le dosage des protéines a été réalisé suivant la méthode de Kjeldahl. C'est une méthode colorimétrique qui consiste à doser l'azote organique contenu dans l'échantillon. Une minéralisation des échantillons a été préalablement effectuée avec de l'acide sulfurique. Cette étape convertit l'azote en sulfate d'ammonium. Le sulfate d'ammonium contenu dans la solution minéralisée libère, après alcalinisation avec de la soude, de l'ammoniac qui est entraîné par distillation à la vapeur, puis titré par une solution d'acide sulfurique 0,04 N. La teneur en protéines a été ensuite déterminée en utilisant 6,25 comme coefficient de conversion.

- **Dosage des lipides par méthode Soxtec**

Pour faciliter l'extraction des lipides, une hydrolyse à l'acide chlorhydrique 37% a été réalisée afin de déstructurer les macromolécules contenues dans les échantillons. Ensuite, environ 1,5g de chaque échantillon ont été pesés dans un papier filtre puis 2 g de sulfate de sodium anhydre ont été ajoutés. L'ensemble a été introduit dans une cartouche de cellulose, refermée ensuite par ajout de coton hydrophile sur le dessus. La cartouche a été intégrée dans un

appareil SOXTEC 2055 (Foss Analytical), puis 70 ml d'éther de pétrole ont été ajoutés. Cet équipement réalise la mise en ébullition, le rinçage et la récupération de l'éther de pétrole (contenant les lipides extraits). Les récipients contenant les extraits ont été séchés pendant 30 min à 100 °C, puis pesés afin de déterminer la différence par rapport à leur poids initial, correspondant à la teneur en lipides.

2.3.3. Dosage des minéraux

Le dosage des minéraux a été effectué en utilisant la méthode de spectrométrie à plasma à couplage inductif (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry, ICP-OES). La méthode est subdivisée en deux étapes. La première étape est l'extraction des minéraux, réalisée dans un digesteur à micro-ondes (MOO-01 Ethos Easy, Milestone, Italie) qui minéralise les échantillons en présence d'eau oxygénée et d'acide nitrique concentré (H_2O_2 /acide nitrique, 1/7, v/v). Après minéralisation, les échantillons ont été amenés dans un état de haute énergie et vaporisés dans un plasma d'argon. Lors de cette deuxième étape, la température dépasse 1000°C, ce qui provoque des phénomènes d'atomisation et d'ionisation. Les éléments générés ont été détectés et quantifiés par spectrophotométrie à émission optique ICP-OES (5100 VDV, Agilent, Etats-Unis d'Amérique).

2.3.4. Dosage des folates (vitamine B9)

La détermination de la teneur en folates a été effectuée en utilisant une méthode adaptée à celle proposée par Kariluoto and Piironen, (2009). La méthode consiste en une extraction tri-enzymatique suivie d'un test microbiologique.

● Extraction enzymatique

Le principe de l'extraction des folates repose sur l'action combinée de 3 enzymes : l'alpha-amylase, la protéase et la γ -glutamylhydrolase de pancréas de poulet. Chaque échantillon a été pesé précisément (0,5 g et 5 ml respectivement pour échantillons solides et liquides) dans un tube de 50 ml. 15 ml du tampon d'extraction (composé de 50 mM CHES (C8210 Sigma), 50 mM HEPES (H3375 Sigma), 2% d'ascorbat de sodium (w/v, A4034 Sigma)! et de 10 mM 2-mercaptopropanoïde, pH 7,85) a ensuite été ajouté. La surface de l'extrait dans chaque tube a été recouverte d'azote gazeux pour éviter une perte de folates due à l'oxydation. Les extraits ont

ensuite été agités au vortex et placés dans un bain-marie à 100°C pendant 10 minutes. Après l'hydrolyse, les extraits ont été refroidis et leur pH a été ajusté à 7,2.

1 ml de solution d' α -amylase (Sigma-Aldrich A9857, 20 mg/ml dans du sodium ascorbate 1%) et 100-200 μ l de solution γ -glutamylhydrolase de pancréas de poulet (R-Biopharm P2002, 100 mg/ml dans l'eau milli-Q) ont été ajoutés, le mélange a été homogénéisé par retournement et les extraits ont été recouverts d'azote à nouveau. Une incubation à 37°C pendant 3h dans un bain-marie sous agitation et à l'obscurité s'en est suivie. A la fin de cette première incubation, 2 ml de solution de protéase (Sigma-Aldrich P5147, 3 mg / ml dans l'ascorbate de sodium à 1%) ont été ajoutés et les extraits étaient de nouveau mis à incuber pendant 1h dans les mêmes conditions que la précédente incubation. L'activité des enzymes a été arrêtée à la fin de la deuxième incubation par chauffage au bain-marie à 100°C pendant 5 min.

Après ajustement du pH entre 6,1 et 6,2, le volume des tubes a été ajusté à 40 ml avec de l'ascorbate de sodium à 0,5 %, et les tubes ont été centrifugés à 8500 rpm pendant 30 min à 4°C. Le surnageant a été ensuite prélevé afin d'effectuer des dilutions avec de l'ascorbate de sodium, pour avoir des concentrations en folates comprises dans la gamme étalon (acide folique, Sigma-Aldrich F7876) utilisée pour la quantification (comprise entre 0,05 et 0,60 ng/ml).

Une farine de référence certifiée (BCR 121 Farine complète, IRMM, Geel, Belgique) a été extraite de la même manière que les échantillons afin de vérifier la précision des résultats.

● Test microbiologique avec *Lactobacillus rhamnosus* ATCC 7469

Le dosage microbiologique est basé sur la consommation des folates par le *Lactobacillus rhamnosus* ATCC 7469 sur des microplaques à 96 trous. Cette souche bactérienne est dépendante des folates pour sa croissance. Afin de doser la teneur en vitamine B9 des extraits, un milieu de culture *Folic Acid Casei Medium* (Difco, Sparks, MD, USA) à pH 6,1 et contenant de l'acide ascorbique a été préparé. La suite des étapes était effectuée stérilement sous hotte microbiologique.

Le milieu de culture a été filtré à 0,2 μ m afin d'éviter la présence d'autres bactéries. Une suspension bactérienne a été réalisée en diluant 1 ml de *Lactobacillus rhamnosus* (cryo-préservé dans du glycérol 80%) avec 2,5 ml d'une solution de NaCl 0,9 % (w/v) préalablement autoclavée. Le milieu a été ensuite inoculé avec la suspension bactérienne environ 15-30

minutes avant de commencer à remplir la microplaque à 96 puits avec les échantillons dilués. Le milieu inoculé a ensuite été ajouté dans chaque puit.

A la fin, la microplaque a été scellée avec un film plastique imperméable à l'oxygène, puis mise à l'étuve à 37°C pendant 18h.

La lecture de la densité optique a été réalisée à 590 nm, avec 20 secondes d'agitation avant lecture. Cette mesure permet de déterminer la turbidité (indicateur de la croissance bactérienne) dans tous les puits. Les valeurs d'absorbance obtenues ont été reportées afin de tracer la courbe d'étalonnage, qui a permis par la suite de calculer les teneurs en folates des différents échantillons.

2.3.5. Dosage de la thiamine (vitamine B1)

Le dosage de la thiamine a été effectué par hydrolyse acide suivie d'une oxydation de la thiamine en thiochrome et d'une séparation chromatographique par détection en fluorescence. La méthode utilisée est celle proposée par Schmidt et al., (2017) avec quelques modifications.

- ***Extraction de la thiamine libre et des formes phosphatées***

1-2 g d'échantillons solides (en fonction du type d'échantillon : matière première ou plat traditionnel) ou 5 ml d'échantillon liquide (eau de trempage) ont subi une hydrolyse acide avec du HCl 0,1 N à 100°C pendant 1h. Après cette étape, les échantillons ont été centrifugés à 8500 rpm pendant 15 min à 4°C. Le BCR 121 a également été utilisé comme échantillon de référence.

- ***Oxydation en thiochrome***

2,5 ml de chaque extrait ont ensuite été oxydés pendant 2 min avec du potassium hexaferranocyanure pour obtenir du thiochrome. La réaction d'oxydation a été arrêtée avec 800 µL d'acide ortho-phosphorique 85%.

- ***Quantification par séparation sur UPLC***

La détermination de la thiamine libre, de la thiamine monophosphate (TMP) et de la disphosphate (TDP) a été réalisé par injection de 4 µl des échantillons oxydés sur l'UPLC (Waters, Milford, MA, USA) avec une détection en fluorescence (excitation =365 nm et émission = 435 nm). Des gammes des standards de thiamine hydrochloride, de TMP et de TDP (concentration variant entre 0,005-0,5 µg/ml) ont été également analysées afin de permettre

la quantification des trois formes de thiamine dans les échantillons. Les solutions standards ont également été oxydées avant injection. La phase mobile consistait en un gradient réalisé avec du tampon d'acétate de sodium (15 mmol) et du méthanol. Un gradient a été appliqué à un débit de 0,42 ml/min avec une durée de 6 min par injection. Une colonne HSS T3 (100 mm x 2,1 mm i.d., 1,7 µm) a été utilisée. Pendant l'analyse, la température de la colonne était réglée à 40°C. Les teneurs en TMP et en TDP ont été converties en équivalent thiamine et la somme des trois formes de vitamère a été réalisée afin de déterminer la thiamine totale.

2.3.6. Dosage des alpha-galactosides

- ***Extraction pour dosage des sucres***

3ml d'éthanol à 78 % (v/v) ont été ajoutés à 80 mg d'échantillons solides puis l'ensemble a été agité au vortex. Les échantillons ont ensuite été placés dans un bain-marie à 80°C pendant 20 minutes en agitant au bout de 10 minutes d'incubation. Après l'extraction, les échantillons ont été refroidis et une centrifugation à 4°C pendant 15 min à 4500 rpm a été réalisée et le surnageant a été récupéré. L'opération précédente a été répétée. Les deux surnageants cumulés (6 ml) ont été mis à évaporer sous vide (Speedvac RC 10).

Les échantillons liquides comme les eaux de trempage n'ont subi l'étape d'extraction.

- ***Quantification des sucres***

La séparation et la quantification des alpha-galacto-oligosaccharides ont été réalisées par chromatographie d'échange d'anions à haute performance (HPIC) dotée d'une détection à ampérométrique pulsée (Thermo Scientific™ Dionex™ ICS-6000 HPIC™ System). Une colonne d'analyse Dionex™ CarboPac™ PA210-Fast-4 µm (150 x 4 mm) et une colonne de garde Dionex™ CarboPac™ PA210-Fast-4 µm (30 x 4 mm) ont été utilisées. L'élution a été réalisée à 30°C avec un débit isocratique à 0,8 ml/min. La phase mobile était une solution de KOH à 12 mmol/L. Le volume d'injection variait entre 10 à 25 µL. Les sucres ont été identifiés par comparaison du temps de rétention avec celui des standards appropriés (galactose, glucose, fructose, saccharose, raffinose).

2.3.7. Dosage des phytates

- ***Extraction pour le dosage des phytates***

La détermination de la teneur en inositol hexaphosphate (IP6) suivant la méthode proposée par Lestienne et al., (2005) avec quelques modifications. 5 ml de HCl 0,5 M ont été ajoutés à 100 mg d'échantillons lyophilisés. Le mélange a été agité au vortex puis chauffé pendant 6 min dans de l'eau bouillante. Après l'extraction, une centrifugation à 4500 rpm pendant 15 min a été effectuée et le surnageant a été récupéré. L'extrait a été conservé à -20°C jusqu'aux analyses.

- ***Quantification de l'IP 6 dans les échantillons***

Pour la détermination, les extraits ont été décongelés (environ 30 min avant injection), dilués avec de l'eau ultrapure (1/25, v/v) puis filtrés à 0,45 µm. La détermination de la teneur en IP6 a été effectuée par séparation chromatographique sur un HPIC (Dionex, Sunnyvale, CA, USA). La phase mobile était un gradient composé de NaOH (200mM) et d'eau ultrapure.

2.3.8. Mesure de couleur

Les mesures de couleur (L^* , a^* et b^* , représentant respectivement la luminescence, le rouge et le jaune) ont été effectuées sur les croutes des beignets à l'aide d'un chromamètre (Minolta, modèle CR 400) et du logiciel CR400 utility. L'appareil a été étalonné avec une plaque de calibration blanche (de coordonnées $Y= 92,7$; $x= 0,3166$; $y=0,3328$). Dix mesures ont été effectuées sur chaque échantillon.

2.3.9. Mesure de granulométrie

Des mesures de granulométrie par voie humide ont été réalisées sur les pâtes des deux modalités de broyage (fine et grossière) de chaque type de beignets. Le granulomètre Mastersizer 3000 (Malvern) avec la cellule de mesure HydroMV a été utilisé et 3 mesures ont été effectuées par échantillon.

2.4. Modélisation des phénomènes de diffusion au cours du trempage des gritz de niébé

Un bilan molaire a été préalablement réalisé pour les deux composés afin d'estimer les proportions de pertes et/ou de production des différents alpha-galactosides, du galactose et des vitamères de la thiamine au niveau du couple eau de trempage – gritz trempés par rapport aux gritz lavés initiaux ($t = 0$ min).

La modélisation de la diffusion des différents composés dans l'eau de trempage a ensuite été réalisée en utilisant deux différents modèles empiriques proposés par Syamsiah and Marseno, (2016) et Perez et al., (2011). Ces modèles ont été utilisés respectivement pour décrire l'extraction du glucomannane de la plante *Amorphophallus muelleri Blume* et de l'huile des graines de tournesol. Des modèles d'extraction ont été sélectionnés en raison de l'état déstructuré des gritz de niébé (cotylédons concassés). La résolution numérique a été effectuée à l'aide de l'outil « Solver » du logiciel Excel.

2.5. Traitements des données

2.5.1. Analyse des données d'enquête

2.5.1.1. Calculs préliminaires

- Pondération des données

Dans les trois zones d'études, une pondération a été réalisée afin d'attribuer à chaque enquêté un poids qui correspond à sa représentativité dans sa population. Cette opération a permis de tenir compte de l'hétérogénéité de la taille des populations dans les grappes (quartiers/villages) sélectionnées. La pondération a été réalisée avec le logiciel Excel. Les enquêtés étant sélectionnés suivant un plan d'échantillonnage à deux degrés, les probabilités de tirage des grappes et de chaque individu enquêté ont été calculées et l'inverse du produit des probabilités correspond au poids (représentativité) de chaque individu dans sa population (Fig 2.6).

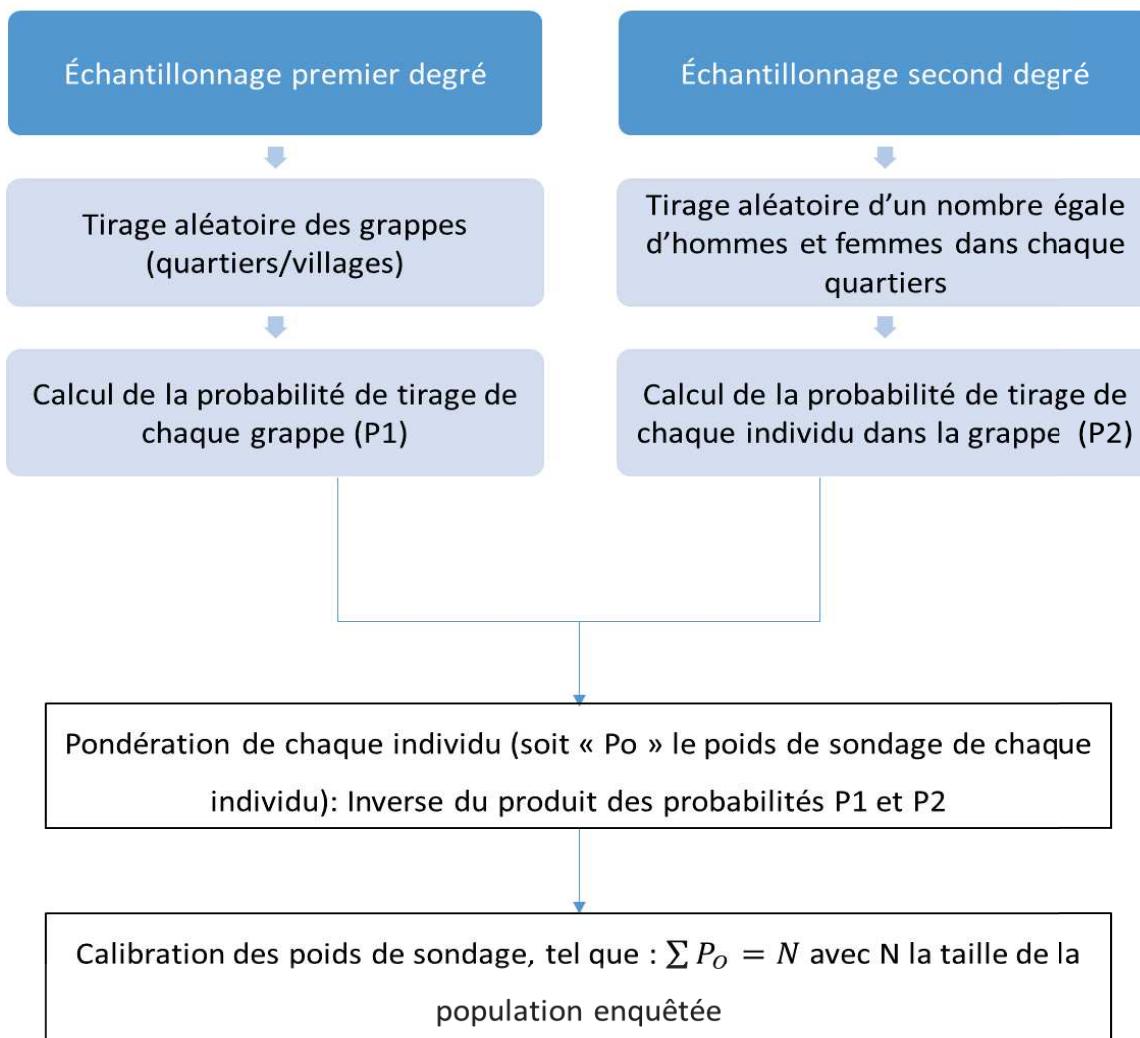


Fig 2. 6 : Schéma de pondération de participants aux enquêtes FFQs

- **Détermination des classes socio-économiques**

La construction des classes socio-économiques dans les zones d'étude a été réalisée suivant les caractéristiques du ménage qui étaient : la qualité de l'habitat, les biens possédés, les revenus et dépenses du ménage, les caractéristiques socio-professionnelles du chef de ménage. Les étapes de création des classes socio-économiques sont présentées à la figure 2.7.

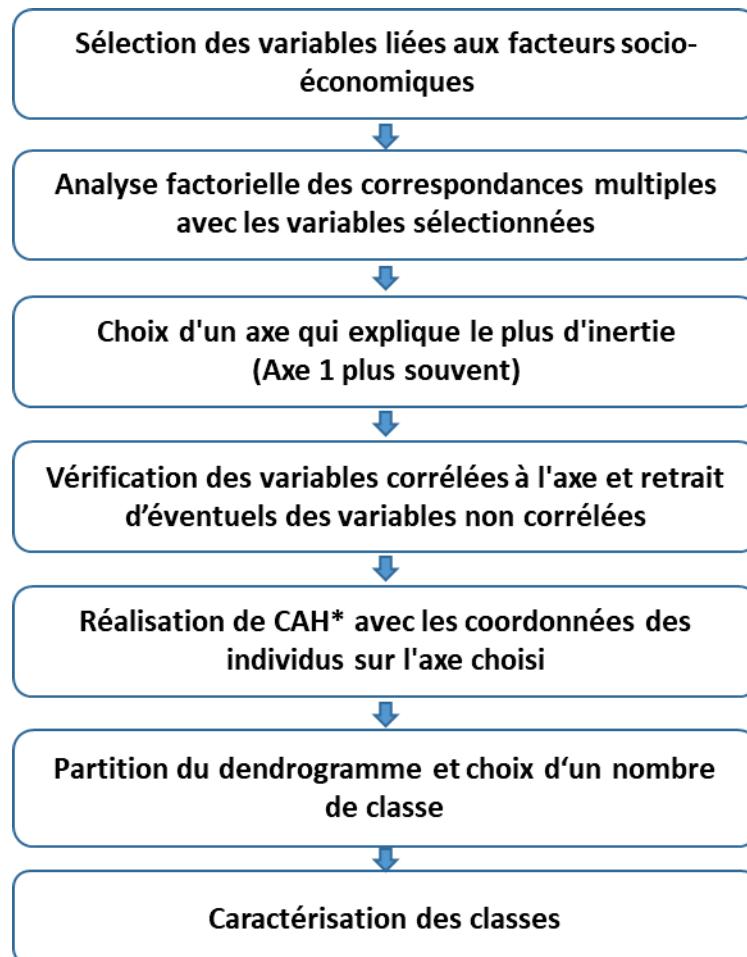


Fig 2. 7 : Etapes de création des classes socio-économiques

* : Classification ascendante hiérarchique

- **Estimation de la quantité de graines de niébé consommées**

Pour estimer la quantité de graines de niébé consommée au cours de la semaine précédent les enquêtes FFQs, un calcul a été effectué en utilisant la quantité de chaque plat à base de niébé identifié par les enquêtés dans le catalogue photo comme portion habituellement consommée.

Les formules utilisées étaient les suivantes :

$$Q_i(\text{base sèche}) = \frac{1}{100} (P * F * TMS_a * R * (100 - L) * \frac{1}{PG}) \quad (\text{Equation 1})$$

$$QN_i = \frac{Q_i (bs)}{TMS_G} \quad (\text{Equation 2})$$

$$NT_i = \sum_{i=1}^9 QN_i \quad (\text{Equation 3})$$

Dans l'équation 1 :

- **Qi** est la quantité de matière (base sèche) provenant du niébé contenu dans l'aliment (cotylédon ou graines entière),
- **P** : la taille de portion habituellement consommée au cours de la semaine précédent l'enquête,
- **F** : la fréquence de consommation journalière (fréquence hebdomadaire divisée par 7 jours)
- **TMS_a** la teneur en matière sèche de l'aliment,
- **R** : ratio « graines de niébé : autres ingrédients »
- **L** la teneur en lipides de l'aliment
- **PG** : proportion de la partie de la graine (cotylédon ou graine entière) utilisée dans la recette

Dans l'équation 2 :

- **QNi** : est la quantité de niébé (tel que consommé)
- **TMS_G** est la teneur en matière sèche des graines de niébé

Dans l'équation 3 :

- **NT_i** est la quantité totale de niébé consommée à partir des plats de niébé ($i=9$) au cours de la semaine précédent les enquêtes FFQs.

2.5.1.2. Tests statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel Rstudio. Le package « Survey » a été utilisé afin de réaliser toutes les opérations statistiques en utilisant le plan d'échantillonnage préalablement défini. Une fiche récapitulant les informations à tirer des données d'enquête ainsi que les types d'analyses statistiques à réaliser a été préalablement préparée. Les caractéristiques socio-économiques et démographiques de la population des zones étudiées ont été déterminées. Ensuite, des analyses descriptives permettant d'établir un diagnostic de la consommation du niébé par les adultes âgés de 19 à 65 ans ont été réalisées. Des tests de Chi-2 ont été effectués afin de déterminer les facteurs ayant un impact sur la consommation du niébé en général et des plats transformés. Pour identifier les facteurs influençant la quantité de niébé consommée par plat, nous avons utilisé des modèles linéaires adaptés aux données pondérées.

2.5.2. Analyse des données de laboratoire

2.5.2.1. Analyse du plan d'expérience friture

Les effets des facteurs expérimentaux sur les réponses mesurées ont été établis suivant des modèles de régression multiple et quadratique. L'analyse de la variance liée aux modèles a permis d'identifier les termes significatifs. Le niveau de significativité étant fixé à 0,05.

2.5.2.2. Autres analyses statistiques

Toutes les données liées à l'étude des procédés de transformations des beignets de niébé ont été analysées avec le logiciel Statgraphics Centurion 16.2 (FranceStat, Neuilly, France). Les résultats ont été présentés sous la forme de moyennes \pm écarts types de deux ou trois répétitions d'analyses en fonction du composé. Des analyses de variance (Anova) à un ou plusieurs facteurs suivis d'un test de Newman-keuls ($P < 0,05$) ont été réalisées afin de déterminer le niveau de significativité des différences entre les groupes. Des modèles linéaires généralisés (GLM) ont été également réalisés pour identifier les paramètres des procédés de transformations ayant un effet significatif ($P < 0,05$) sur chaque composé. Des proportions de contributions des facteurs à la variabilité des teneurs des différents composés ont été également déterminées en appliquant une analyse de variance à facteurs imbriqués ($P < 0,05$).

Chapitre 3 : Résultats

3.1. Motivations et freins à la consommation du niébé

L'urbanisation croissante, l'évolution des revenus et l'accès aux aliments transformés sont des facteurs entraînant dans les pays du sud des changements dans les habitudes alimentaires. La consommation du niébé au Bénin pourrait être affectée par ces facteurs ou serait plus faible dans les villes qui sont plus touchées par ces changements socio-économiques comparativement aux zones rurales.

Afin d'établir un diagnostic de la consommation du niébé, des enquêtes de fréquences de consommation (FFQ) ont été réalisées auprès de 1217 adultes âgés de 19 à 65 ans à Cotonou (zone urbaine), et les communes d'Adjohoun et Allada (zones rurales). 16 discussions de groupes ont également été réalisées auprès d'hommes et de femmes de différentes classes d'âge (19-30 et 55-65 ans), sélectionnés de façon à caractériser d'éventuelles évolutions de consommation suivant les générations (jeunes vs seniors), ou des différences selon le sexe et l'espace (rural vs urbain).

Cette première partie de notre étude met en évidence :

- La consommation de légumineuses en général
- Les déterminants de la consommation du niébé (raisons de consommation ou de non-consommation)
- Les tendances de consommation du niébé entre Cotonou et les zones rurales étudiées.

Les résultats sont détaillés dans la première publication de cette thèse qui est intitulée « Consumption patterns of cowpea-based foods in Benin: main bottlenecks and changes over time or according to the place of residence».

3.1.1. Publication 1: Consumption of cowpea-based dishes in Benin: main motives and barriers, and spatial and temporal changes

For supplementary material, see "Annexe 4"

Statut : Article soumis dans Legume Science

Abstract

Background: In Benin, cowpea dishes are part of traditional recipes. Urbanization and changing in incomes are factors leading to changes in eating habits in developing countries. This study aimed to determine factors influencing cowpea consumption and highlight changes between generations concerning cowpea consumption in rural and urban areas.

Methods: A Food Frequency Questionnaire (FFQ) survey was performed among 1217 adults in Cotonou (urban area), Adjohoun and Allada (rural areas) by considering nine cowpea dishes classified into three groups (doughnuts, stews, mixed dishes). Sixteen focus group discussions were also conducted with 7 to 13 participants in each area.

Results: During the FFQ week, cowpea seeds were consumed by 90-95% of the respondents. The non-consumers of cowpea dishes mostly identified preference to other foods and lack of availability as street food as reasons of non-consumption. Concerning the place of consumption of cowpea dishes, the doughnuts were mostly consumed as street food compared with other cowpea dishes groups. During the focus groups, the participants highlighted that the current level of cowpea consumption decreased compared with the previous generations. Concerning changes in the consumption of cowpea dishes, our study showed that only the mixed dish Atassi and the stew Abobo did not present variations within time compared with other dishes which were currently consumed less than in the past by the respondents or never consumed.

Conclusion: Our findings nurture knowledge regarding the level of cowpea consumption and key determinants influencing the consumption of some cowpea traditional dishes in rural and urban areas.

Keywords: Nutrition, pulses, dietary habits, consumer's perception

1. Introduction

Pulses are valuable dry seeds with excellent nutritional properties and numerous bioactive compounds, including phytochemicals, bioactive peptides, and fermentable fibres (Padhi and Ramdath, 2017). However, their nutritional quality is limited by the presence of both heat-labile and heat-stable anti-nutrients (Phillips *et al.*, 2003), which can influence their consumption. Moreover, consumers' preferences for pulses are based on some factors such as the storage capacity, the cooking time, and the sensorial characteristics of the seeds (Pushpamma, 1975). Pulse consumption is also affected by economic factors such as income levels of consumers, as well as purchase prices. Changes in tastes and eating habits and levels of awareness on the nutritional potential of pulses also appear to be factors affecting trends in their consumption (Rawal and Navarro, 2019). In food science field, it is necessary to understand how consumers perceive dishes, how their needs are shaped and influenced, and how they make food choices to study consumers' behavior (van Kleef *et al.*, 2005).

In West Africa, cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] is the most produced pulse (Phillips, 2012). It is usually grown as an intercrop with pearl millet (*Pennisetum glaucum*) or sorghum (*Sorghum bicolor*) and less frequently with maize (*Zea mays*), cassava (*Manihot esculenta*), or cotton (*Gossypium* sp.) (Timko and Singh, 2008). Cowpea seeds are a major staple food for the sub-Saharan Africa population, especially in the dry savanna regions of West Africa and a source of proteins and vitamins, feed for animals, also a cash income crop for farmers (Asare *et al.*, 2013). Within 2012-2014, cowpea production in sub-Saharan Africa represented 96 percent of worldwide production (Rawal and Navarro, 2019).

In Benin, cowpea-based dishes are part of traditional recipes. Though cultural and historical backgrounds influence food preferences, food preparation methods, and eating habits (Bovell-Benjamin *et al.*, 2009), urbanization could also change people's behavior. People are out of their home the whole day and often buy their food outside. Therefore, their food habits are modified because they have more choices, less time to cook, access to processed foods, and the pressure of the media is intense (Leterme and Muñoz, 2002). The rapid economic growth observed in developing countries leads to changes in food processing, partly contributing to nutrition transition (Galbete *et al.*, 2017) and this could also decrease the frequencies of consumption and quantities consumed of traditional dishes, such as those

prepared with cowpea seeds. For example, in the French population, Melendrez-Ruiz et al., (2020) reported that pulses consumption decreased from 7.2 to 1.7 kg/person/year from 1920 to 2016, and remained very low since, despite the promotion efforts from the food industry and national authorities. In Benin, the influence of changes in consumer's habits on consumption frequencies and quantities consumed of traditional cowpea-based dishes is not established and to our knowledge, there are no studies reporting the difference of consumption between rural and urban areas and changes over the generations. Therefore, through a Food Frequency Questionnaire survey and focus groups in an urban area (Cotonou) and two rural areas (Adjohoun and Allada), our work first aimed at understanding the motivations as well as the barriers to the consumption of cowpea-based dishes and to identify whether there are changes in the cowpea consumption pattern between generations. Legume consumption in general was also investigated.

2. Material and methods

2.1. Food frequency questionnaire (FFQ)

The surveys were performed among 1217 adults aged between 19 and 65 years and living in Cotonou (urban area), Adjohoun and Allada (rural areas, respectively high and low cowpea production areas). Two-stage sampling was performed for the selection of the respondents to obtain a representative sample of each study area. The first step consisted of a random selection of the clusters (neighborhoods or villages). At the second stage, an equal number of women and men was interviewed in each cluster. The FFQ covered a retrospective period of seven days, and aimed at identifying all species of legumes consumed in surveyed areas and corresponding dishes, the frequencies of consumption of cowpea dishes and related quantities consumed, as well as the factors limiting of their consumption. Nine most known cowpea dishes among those identified by Madode et al., (2011) were selected for this study. These dishes were doughnuts (Ata, Ata-doco, Ataclè), stews (Abobo, Vêyi, Adowè), and mixed dishes (Atassi, Djongoli, Abla).

In the rest of the article, the period of “the seven retrospective days” covered the surveys will be referred to as “the FFQ week”.

2.2. Sampling of the focus group participants and data collection method

Sixteen focus groups were performed with two different age classes (19 to 30 and 55 to 65 years) of men or women in Cotonou and the rural areas. The two age groups were chosen to capture eventual differences in cowpea consumption between generations. In Cotonou, two focus groups were held per sex and per age class in two different neighborhoods. In each of the two rural areas, one focus group was performed per sex and per age class.

Seven to thirteen people participated in each focus group. Their duration varied from 1 hour to 2.5 hours. An interview guide was developed for carrying out the focus groups. The topics discussed were about the local foods usually consumed by the community, the consumption of legumes, the knowledge about cowpea and related dishes, the changes in cowpea consumption over time and according to the place of residence (rural vs. urban), and the motives as well as the barriers to the consumption of cowpea. A moderator led the discussions based on the interview guide. Depending on the answers, other questions were asked by the moderator to obtain more explanations from the participants (e.g. *How?* *What else?* *Why?*). The discussions were translated from local languages (“Fon” in Cotonou and Allada, and “Wémègbé” in Adjohoun) into French and fully transcribed into text.

2.3. Data collection

- **Food frequency questionnaire (FFQ) data**

The questionnaire was administered to the respondents using quantitative food frequency forms saved on tablets using the SurveyCTO platform.

- **Focus group data collection**

During the focus groups, the participants’ discussions were noted directly by a reporter in a notebook. To allow the full transcription of each discussion, a recording was made using a dictaphone with the agreement of the participants.

2.4. Ethical considerations

The study was approved by the National Committee of Ethics for Health Research of Benin (Comité National d’Ethique pour la Recherche en Santé, CNERS) and all participants signed a consent form, which was orally translated into local dialect if needed. The anonymity of the respondents was preserved as it was attested on the consent note.

2.5. Data analyses

- FFQ data analysis**

Data were analyzed with Rstudio software (R version 4.0.5). Most of the data were expressed as percentages of respondents. Chi-2 tests were carried out to determine the difference between Cotonou and rural areas concerning the consumption of legumes during the FFQ week. Logistic regressions were used to determine associations between socioeconomic and demographic factors (level of education, sex, socioeconomic index (SEI), and age) and cowpea dish consumption. For all analyses, statistical significance was set at a p-value <0.05.

- Focus group data interpretation**

Focus group data were analyzed using the content analysis method (Hsieh and Shannon, 2005). After reviewing the transcripts, the responses of the participants from the different focus groups were compared and confronted to determine similarities and dissimilarities. Briefly, the data were examined using thematic analysis. Identification of keywords and important most recurring factors in the discussions was performed by theme. The data were classified by themes according to the objectives of our study using an excel file to generate a narrative synthesis and an interpretative analysis of the data.

3. Results

3.1. Legume consumption

The consumption of legumes mostly available in the study areas (cowpea, soybean, peanut, bambara groundnut, kersting's groundnut, african locust bean) during the FFQ week is presented in table 3. 1. Significant differences were observed concerning the proportion of consumers of all legumes (except for peanut) between Cotonou and the rural areas. For cowpea, the percentages of consumption between Cotonou and the rural areas were statistically significant, but only 5% of differences were observed between both types of areas. Cowpea seeds were much more consumed than other legumes, while the consumption of kersting's groundnut was lower. Soybean was more consumed in the rural areas than in Cotonou. Opposite results were observed for african locust bean consumption. Concerning peanut consumption during the FFQ week, no significant difference was found between Cotonou and the rural areas and the proportion of peanut consumers represented about two-third of the respondents. The percentage of bambara groundnut consumers in Cotonou were two times the one in the rural areas. In Cotonou, the percentages of consumption of the different legumes can be ranked as follows: cowpea> peanut> african locust bean> soybean> bambara groundnut> kersting's groundnut. In the rural areas, the percentages of consumption of the different legumes were ordered as follows: cowpea> soybean> peanut> african locust bean> bambara groundnut> kersting's groundnut.

Legumes other than cowpea were consumed in the form of various dishes (annexe 4, figure 1S, supplemental material). In all surveyed areas, soybean was mainly consumed as tofu (a non-traditional food in Benin, adopted by the population around the past three decades), kersting's groundnut as "cassoulet", bambara groundnut as a stew, and african locust bean, as a fermented seasoning (locally named afitin, and widely consumed in West Africa). In the studied areas, peanuts were mainly consumed as snacks and there was low use for the preparation of main courses (e.g. sauces). The two main forms of consumption during the FFQ week were roasted peanut and a spicy peanut snack in the rural areas, while in Cotonou they were also consumed boiled peanut.

Tab 3. 1 : Percentages of respondents consuming cowpea and other locally available legumes during the week before the FFQ survey in Cotonou and the rural areas of Adjohoun and Allada (% respondents)

Legumes	Urban (N=641)	Rural (N=576)	p-value[#]
Cowpea (<i>Vigna Unguiculata</i>)	90	95	<0·001
Soy (<i>Glycine max</i>)	45	75	<0·001
Peanut (<i>Arachis hypogaea</i>)	63	68	NS
African locust bean (<i>Parkia biglobosa</i>)	59	36	<0·001
Bambara groundnut (<i>Vigna subterranea</i>)	27	15	<0·001
Kersting's groundnut (<i>Macrotyloma geocarpum</i>)	10	2	<0·001

#: Chi-2 test for differences between urban and rural area

3.2. Consumption of cowpea dishes

3.2.1. Influence of socio-economic and demographic factors

In the rural areas, the consumption of all cowpea dishes (except Djongoli and Abla) during the FFQ week was influenced by some socio-economic and demographic factors (Table 1S, supplemental material). Concerning the difference between the rural localities, Atassi consumption was significantly lower in the low cowpea production area (Allada) compared with the high production area (Adjohoun). For the socio-economic factor effect, Adowè consumption was lower in the low SEI compared with the other groups. For the doughnut Ata, only respondents in the high SEI class consumed more than the two other socio-economic groups. For Abobo and Atassi, a high SEI was associated with lower consumption. Concerning the gender effect, the different cowpea dishes were consumed equally by men and women. Concerning the influence of the factor education, Adowè and Véyi consumption in the high education level was significantly lower compared with the other education level, while for Atadoco, Ataclè, and Atassi consumption, the opposite was observed.

In Cotonou, only the consumption of Ata, Ata-doco, Abla, Abobo, and Djongoli during the FFQ week was influenced by the socio-economic and demographic factors (table 2S, supplemental material). For Ata, the most significant association was related to gender with a lower proportion of consumption among women. Abla consumption during the FFQ week was significantly higher for respondents aged between 27 and 44 years compared with the participants under 27 years. Abobo consumption was significantly associated with the SEI class with a higher consumption observed for the respondents with high SEI.

3.2.2. Reasons of non-consumption of cowpea dishes

The two most consumed cowpea dishes during the FFQ week irrespective of the area were the stew Abobo (70 to 87% of the cowpea seed consumers) and the mixed dish Atassi (71 to 79% the cowpea seed consumers) (Table 1S to 2S, supplementary material). In Cotonou, Adowè and Ataclè were less consumed compared to other cowpea dishes while in the rural areas, fewer respondents consumed Abla and Ataclè.

The reasons of non-consumption of cowpea dishes (except for Atassi and Abobo that were widely consumed) were mainly the preference for other dishes and the lack of availability of the dishes as street food (Tab 3. 2). Fewer respondents choose the length of cooking time, expensiveness of the dishes, as well as digestive discomforts in both areas.

Tab 3. 2 : Reasons for non-consumption of cowpea-based dishes during the FFQ week

Cowpea food groups	Cowpea dishes	Number of non-consumers per cowpea dish ‡	Reasons for non-consumption											
			Long cooking time or difficult to make		Expensive to make		Dislike or prefer other foods		Digestive discomfort		Lack of availability as street food			
			U	R	U	R	U	R	U	R	U	R	U	R
Stews	Abobo	185	69	5	1	2	0	81	24	30	8	11	1	
	Vêyi	484	488	35	2	12	13	328	80	32	14	58	139	
	Adowè	476	530	95	95	13	35	234	47	27	7	119	291	
Cowpea-based doughnuts	Ata	276	443	20	12	3	14	125	53	18	13	45	230	
	Ata-doco	534	377	21	2	1	13	331	80	35	14	188	72	
	Ataclè	588	530	26	39	0	19	310	66	31	6	299	335	
Mixed dishes	Atassi	182	125	16	4	4	19	60	32	9	9	17	3	
	Abla	596	480	47	53	7	47	318	61	21	8	310	230	
	Djongoli	531	352	84	30	24	18	276	129	60	45	136	17	

Data are numbers of respondents. Multiple choices were allowed. U= urban, R = rural. ‡ Total number of each cowpea dish non-consumers during the FFQ week among the population of cowpea consumers (n=626 in urban area, n=565 in rural areas).

When questions were asked to all the cowpea consumers (n=626 in Cotonou and n= 565 in rural areas) concerning digestive discomforts, respectively 40% and 62% reported to have encountered digestive problems after consumption of cowpea dishes during the FFQ week (figure 2S, supplemental material).

In Cotonou, abdominal pains and flatulence were the most inconveniences cited whereas it was mainly flatulence and constipation in the rural areas.

3.2.3. Place of consumption

During the FFQ week, most of the cowpea dishes were consumed either at home or out of home as street food (Figure 3S). In Cotonou, the cowpea dishes mostly consumed out of home were Ata, Ata-doco, Ataclè, Adowè, and Abla while the dishes Abobo, Atassi, Vêyi, and Djongoli were mostly consumed at home. Concerning the rural areas, similar trends were observed. The percentages of consumption of the different dishes at a relatives (e.g. friends) place were very low.

By comparing the place of consumption between cowpea dishes groups, we observed that the doughnuts were mostly consumed as street food compared with the stews (except for Adowè) and the mixed dishes (except for Abla).

3.2.4. Perceptions of the FFQ survey participants about cowpea consumption

The perceived opinions about the inter-population (Cotonou vs. rural areas) and intra-population (own consumption vs. the one in the community) level of cowpea consumption, as well as the factors limiting to cowpea consumption were asked to all the respondents of the FFQs (n=641 in the urban area and n=576 in the rural areas) (Tab 3. 3). Concerning the inter-population level of cowpea consumption, about 72 to 87% of the respondents in all study areas identified Cotonou, the urban area, as the most cowpea consumer. Regarding the intra-population level of cowpea consumption, about one-half to two-thirds of the participants considered that their level of consumption was lower than the one of their area.

In Cotonou and the rural areas, the limit to cowpea consumption most often identified by all FFQ participants was digestive discomforts (56-87%). More respondents in the urban area selected the perishability of the seeds or the dishes or preference for other foods than in the rural areas, while the expensiveness of the cowpea seeds and cooking constraints were mostly identified in the rural areas compared with the urban one.

Tab 3. 3 : Participants' perceived opinions on cowpea consumption in the FFQs

		Percentages (%)	
		Urban (n=641)	Rural (n=576)
Level of consumption "Cotonou vs. rural areas" <i>(inter-population level)</i>	More than in our area	4	72
	Less than in our area	87	16
	Not different	9	2
	Do not know	-	10
Level of consumption "own consumption vs. the one of the community \$" <i>(intra-population level)</i>	More than our area	14	22
	Less than our area	71	51
	Not different	15	9
	Do not know	-	19
Limits to cowpea consumption ‡	Cooking constraints	20	28
	Perishability (seeds/foods)	25	9
	Expensive	0	24
	Digestive discomforts	56	87
	Preference of other foods	18	3
	Others	2	5

‡ Multiple choices or answers were allowed. \$ inhabitants of the same area

3.3. Communities views on cowpea consumption: focus group discussion

The common themes or keywords, which emerged from the discussion groups, are presented in table 3. 4. These themes indicated the opinion of the participants concerning the barriers and motives concerning cowpea consumption.

3.3.1. Main foods in the diet of the population

The main foods cited by the participants as major components of their diets were cereal products, tubers, legumes, sauces, and leafy vegetables. The foods mentioned were mainly traditional recipes, which can be fermented dishes (Akassa, Mawê), or thick dough. However, some dishes were specific to the area, age, and gender.

The respondents reported that the choice of these dishes was related to their childhood's dietary habits because those foods were the most available in their environment.

"Maize paste is a meal more consumed because we are in the village and we produce a lot of maize" (Old women, Adjohoun)

"Maize paste and Akassa are meals that we grew up with" (Old men, Cotonou).

In Cotonou, street food consumption is becoming increasingly frequent in the youth population.

"We eat frequently Attiékè as street food" (Young women, Cotonou)

"We also eat macaroni (pasta) in the cafeterias of the babas (a name given to people from the Sahel)" (Young men, Cotonou).

3.3.2. Knowledge about Legume

To allow all participants to better identify the legumes known in their community, the question asked was formulated as follows: *"We found that bean-type seeds such as soybeans, cowpeas, kersting's groundnut, cowpeas, African locust bean and bambara groundnuts are the most popular in your area. Do you know any other seeds of the same type that are not mentioned and are consumed by your family and friends?"*.

Despite this descriptive question, the participants identify sometimes identified cereals such as sorghum or millet or other crops like pumpkin seeds.

"Isn't sorghum a legume? It is a seed similar to cowpea." and another participant retorted *"No, sorghum is too small"* (Young men, Cotonou).

Tab 3. 4 : Focus group topics and keyword generated from the discussions

Topic	Keywords
Food habits of the communities	Maize porridge – Fermented/unfermented maize dough – rice, Abobo (cowpea stew) – tubers and tubers (boiled/fried sweet potatoes, yam and taro) – cooked/added into water gari (roasted fermented cassava granular) – tofu-like processed soybean – Atassi (mixed cowpea -rice) – rice – sauces (cooked tomato/leaves) – Macaroni (pasta)
Knowledge of legumes	<p>Best known legumes :</p> <p>Cowpea – Bambara groundnut – peanut - African locust bean – soybean – pigeon pea – common bean (local name “Akpakoun”) – Kersting's groundnut</p>
Health and cowpea seeds	<p>Advantages:</p> <p>Source of energy – provide vitamins – rich in nitrogen – improve blood – satiating – give intelligence – eliminate dirties the from body – healthy food – give strength.</p> <p>Disadvantages:</p> <p>Difficult to digest when consumed in the night – constipation – diarrhoea – contain more sugars when first cooking water is not discarded – bloating – not good for blood pressure if not properly cooked – gas – not good for people in feverish state or with certain diseases (haemorrhoid, hernia)</p>
Knowledge about traditional cowpea dishes	Abobo – Atassi – Djongoli – Abla – Ata doco – Ata – Vêyi – Ataclè – Adjebokoun – Adowè – Kowé – Magni-Magni – Yôyôwè – Adalou – Don – Ayi blo – Adjagbé – Lèlè
Perception of factors influencing cowpea consumption	Age (decrease in consumption with age) – sex (less consumed by women) – cultural restrictions – digestives troubles – dietary preferences – long processing time – sickness (hemorrhoid, hernia) – complete ignorance about the recipe
Changes through different generations	Modification in the ways of cooking and eating – Decrease in frequencies and quantities consumed – disappearing of some traditional dishes.

For some participants it was difficulty to find the name of the legumes.

"There are very small seeds, I have no idea what they call the crops" (Young women, Cotonou)

Concerning legumes listed by the population, we observed that the number in some discussion groups was sometimes beyond the six legumes previously identified as the most known during the setting of the study design. For example, common bean and pigeon were also cited as known legumes.

Some legumes are less consumed than others depending on the area.

Common bean (local name "Akpakoun") was more cited in rural areas or by older people in Cotonou, but they notified that its production was rare. They stated that the Adja ethnic group located in the department of Couffo (south of the country), for example, consumes certain seeds such as pigeon pea and common bean, more than other ethnic groups.

"We grow a few Akpakoun here. Otherwise, you can find it in Adja in quantity" (Young men, Allada)

Some legumes are less produce in the rural areas.

"We don't find the voandzou (Bambara groundnut) here, because we don't produce it. We used to buy it." (Young women, Adjohoun).

3.3.3. Nutritional and health benefits of cowpea

Regarding the health effect related to cowpea consumption, there was a positive perception among the population on the nutritional potential of this legume.

"Cowpea raises the level of blood" (Old women, Cotonou)

"Cowpea provides vitamins"; "It is also a good source of energy" (Young women, Cotonou).

Participants indicated a difference between the brown and white varieties that are the most available for consumption.

"The brown cowpea is the one that gives more energy" (Young women, Cotonou).

"But the white cowpea does not have enough strength" (Young men, Cotonou)

The ability of cowpea seeds to satiate at a low cost than some foods (e.g. rice) was one of the benefits cited in the discussions.

"Cowpea is not easily assimilated and gives strength. It is the meal that is often prepared for the farmers so that when they consume it, they will not be hungry until the evening." (Old men Cotonou).

"Abobo allows you to drink a lot of water, which reduces your desire to eat more food for the rest of the day" (Young men, Cotonou)

3.3.4. Knowledge about cowpea dishes

When participants were asked about their knowledge of traditional cowpea-based dishes, the older groups in both types of areas identified several ancient traditional dishes rarely or not consumed currently by the population.

"Adalou is a rare food, many young people today do not know that" (Old women, Cotonou)

Some cowpea dishes are more frequently consumed than others.

"The meal Abla, it is when you find to buy that you can eat" (Old women Adjohoun)

"I think that we eat more frequently Abobo" (Old men Cotonou)

Variations in the forms of consumption depending on the area were also observed.

"Vêyi is not consumed in our area"; "If I cook Vêyi to my husband, he'll never eat it" (Old women, Adjohoun)

Moreover, the participants also highlighted modification of some traditional recipes.

"Nowadays, we are using a lot of ingredients (e.g. more spices, enhancers...) to cook cowpea stew called Abobo. Before it was simpler. Now, we eat cowpea stew with macaroni, bread ..." (Young women, Cotonou)

3.3.5. Barriers and motivations to cowpea consumption

The respondents highlighted several bottlenecks to cowpea consumption. For some people, the consumption of cowpeas can be influenced by dietary preferences or choices to consume some cowpea dishes instead of others. Elderly people have stated that after consuming cowpeas, there are sometimes complications of some diseases such as haemorrhoids and hernia.

"Cowpea consumption can cause constipation"; "When we eat cowpea, we have difficulty to digest it"; "Cowpeas can worsen haemorrhoids" (Old men, Cotonou).

On the opposite, some participants perceived flatulence occurrence as a positive effect because it helps to discard dirty elements from the body.

"Yes, farting is good"; "As a human being, you must fart"; "It is because there are a lot of vitamins in cowpeas that a lot of farts are released" (Young men, Cotonou)

Participants also pointed out that cowpea dishes have good taste.

"Beyond all this, cowpea is also a food that attracts. When someone else eats it in front of you, you will want to eat it as well" (Young men, Cotonou)

The lack of knowledge of some recipes was also observed within the population mainly, the young one.

"Well, how do they prepare Ataclè?"; "What is the food named Abla?" (Young women, Cotonou)

The consumption of cowpeas was also influenced by the production period, mainly in rural areas.

"Cowpea is less consumed in the lean season" (Old women Adjohoun)

3.3.6. Changes in cowpea consumption between generations

When questions were asked about their opinion concerning the frequency and quantity of consumption of cowpea seeds between grandparents, parents, and young people, the participants recognized that cowpea seeds were more consumed in the past by the grandparents and great-grandparents than nowadays. The reasons evoked for this decrease were the following:

- "- The fertility of the soils decreased or Crop yields are not as high as before.*
- The population increased (then the availability of cowpea decreased)*
- Crop yields are not as high as before.*
- Even the maize yield is not as good as before. You will work hard in the field, and at the end, you will get a low yield."* (Old women, Adjohoun).

Some respondents also stated that the current consumption of certain cowpea dishes decreased compared with when they were young.

"When we were younger we liked to eat these dishes, as we get older, we don't want to eat much of them anymore. We are trying to reduce the amount we eat." (Old women, Cotonou).

The mechanization of some processing operations between generations was also notified.

"- In the time of our grandparents, they ground cowpea seeds using manual millstone... Once you have soaked your cowpea, you have to grind it on the millstone. - Today, people use the community grinder" (Young men, Allada).

The participants also stated that to reduce the cooking time during cowpea seeds preparation and limit the use of combustible, some additives are added nowadays. The use of some ingredients to make the dishes more tastier was also highlighted.

"What people prepare today by adding to the cowpea a flavor enhancer called qtock cube and other strange ingredients is not good. Normally, we put the cowpea on the fire the day before, and the next day, we add the ingredients. Cowpeas without fertilizer must be well seasoned, well-spiced, moderately salted, and accompanied by a good quality oil and gari." (Old men, Cotonou)

4. Discussion

In this study, we described patterns of cowpea-based dishes consumption and investigated perceptions of the population in urban and rural areas in the south of Benin using a food frequency questionnaire (FFQ) and through focus group discussions (FGDs). Concerning the dietary habits of the studied population, our findings from the focus groups data revealed their attachment to traditional foods, which are defined by Bovell-Benjamin *et al.*(2009) as a large part of the cultural heritage of a given population. The latter authors reported similar observations by studying African-Americans' dietary practices. The information obtained from the discussions highlighted some tendencies similar to the results from other studies. Gandonou *et al.* (2019) reported that despite the regional specificity of dietary patterns in Benin, some similarities between rural and urban areas remain, with frequent consumption of maize paste, rice, yam, gari, and cowpeas. They linked this behavior to three factors, which are the reorganization of cropping systems in the central and northern part of the country to face land degradation, urbanization, which leads to an increase in out-of-home consumption, and the promotion of certain crops such as rice and maize by NGOs or government projects.

Concerning legume consumption, our study showed that the percentages of consumption during the FFQ week were more 30% in both types of areas except for bambara groundnut and kersting's groundnut (the lower consumed among all legumes). The focus group participants stated that the kersting's groundnut (local name Doyiwé) is consumed during

special events – “*Doyiwé is cooked for festivities (old women, Adjohoun)*” –. Indeed, kersting’s groundnuts are very expensive legume, and this could explained the low frequency of consumption. In our observed study, we observed an important consumption of soybean mainly in the rural areas, despite the fact that it is not an indigenous legume in Africa. Floquet *et al.*, (2013) reported that soybean was introduced in Benin in the 1980s to improve infant nutrition via a protein-rich food. The latter authors also pointed out that soybean now become a major crop because of it is use as an inexpensive substitute for cow cheese, fish or meat. For example, in our study, we observed that Tofu is a soy-based food highly consumed by the FFQ respondents in Cotonou as well as the rural areas. Indeed, the respondents consider Tofu as a cheap source of protein. The focus group participants from the rural areas pointed out that “*we highly consume soy because it is our fish (old women Adjohoun); we used soybean cheese (tofu) as meat in the sauces (young men Allada)*”. In a study performed based on structured interviews in the locality of Abomey-Calavi (southern Benin, 18 km away from Cotonou), Dossou *et al.* (2017) found that approximately 30%, 62%, and 8% of the surveyed households consumed the soybean cheese 1 to 3 times per month, at least 4 times a month, and daily respectively. They also reported that the most important motivation for soybean cheese consumption was the competitive purchasing price compared with other sources of protein. During focus group discussions, the participants identified several legumes not anymore produced or available in the markets like the common bean. Loko *et al.* (2018) reported that the production of the common bean in Benin declined in recent years and the diversity of the crop is being threatened with extinction. Moreover, Odendo *et al.* (2011) reported that eastern, central, and southern Africa are the main growing regions of this pulse in Africa. In our study, the beliefs of the population concerning the positive health effect of cowpea seeds (e.g. *Cowpea raises the level of blood*; “*Cowpea provides vitamins*”; “*It is also a good source of energy*”) are one of the reasons for their consumption. In the Mexican population, Monge *et al.* (2019) also reported that the health effect of beans and their nutritional composition were among the motives for their potential consumption. In our study, we observed that the population considered cowpea dishes as satiating foods. Indeed, like other pulses, cowpea is a fiber-rich food, and dietary fibres enhances sensation of satiety (Kristensen and Jensen, 2011).

The barriers to cowpea seeds consumption such as lack of knowledge of some recipes, lack of availability of some cowpea dishes, and long cooking time highlighted during the focus group

discussions in our study were also observed by Figueira *et al.* (2019) who studied the Australian attitudes concerning legumes consumption. Non-consumers of cowpea dishes during the FFQ week, mostly identified the preference to other foods and lack of availability as street food as reasons of their non-consumption. In our study, the FFQ participants reported some digestive discomforts after cowpea dish consumption. This could be related to the presence of non-digestible oligosaccharides (e.g. alpha-galacto-oligosaccharides) in cowpeas, which can cause flatulence and bloating. To reduce these compounds, several studies proposed some unit operations like soaking, fermentation or germination.

To assess changes in cowpea dishes consumption over time, we performed an additional study with 150 individuals in the three study areas (Fig 3.1). For most of the nine cowpea dishes except for the stew Abobo and the mixed dish Atassi, the majority of the respondents answered that their consumption decreased compared with the past, and for some, they never consumed them. Thus, these results showed the extent to which most of the traditional cowpea recipes are disappearing.

Concerning the place of consumption of cowpea dishes, we observed that the doughnuts were mostly consumed as street foods compared with other cowpea dishes groups. This could be due to their constraining processing methods, which involves several unit operations, thus limiting the possibility to cook them easily at home.

The lack of availability, the long cooking time, the lack of knowledge of traditional recipes, and preferences for others foods are all the barriers that could partly explain the influence of some socio-economic and demographic factors observed among the population.

Some recommendations to limit the influence of the barriers to cowpea-dish consumption could be the development of booklet of traditional recipes for the population and mainly for the young generation. Ready-to-use cowpea products (e.g. dehulled cowpea flour for doughnuts preparation) could also be developed to reduce processing constraints. In school programs, educating children on the importance of cowpeas and other legumes (by emphasizing consumers' benefits like health advantages and sensory quality) and learning recipes through cooking workshop could also be a way to preserve traditional recipes. Concerning cooking constraints, scientists should develop culinary guidelines allowing the population to use convenient cooking practices.

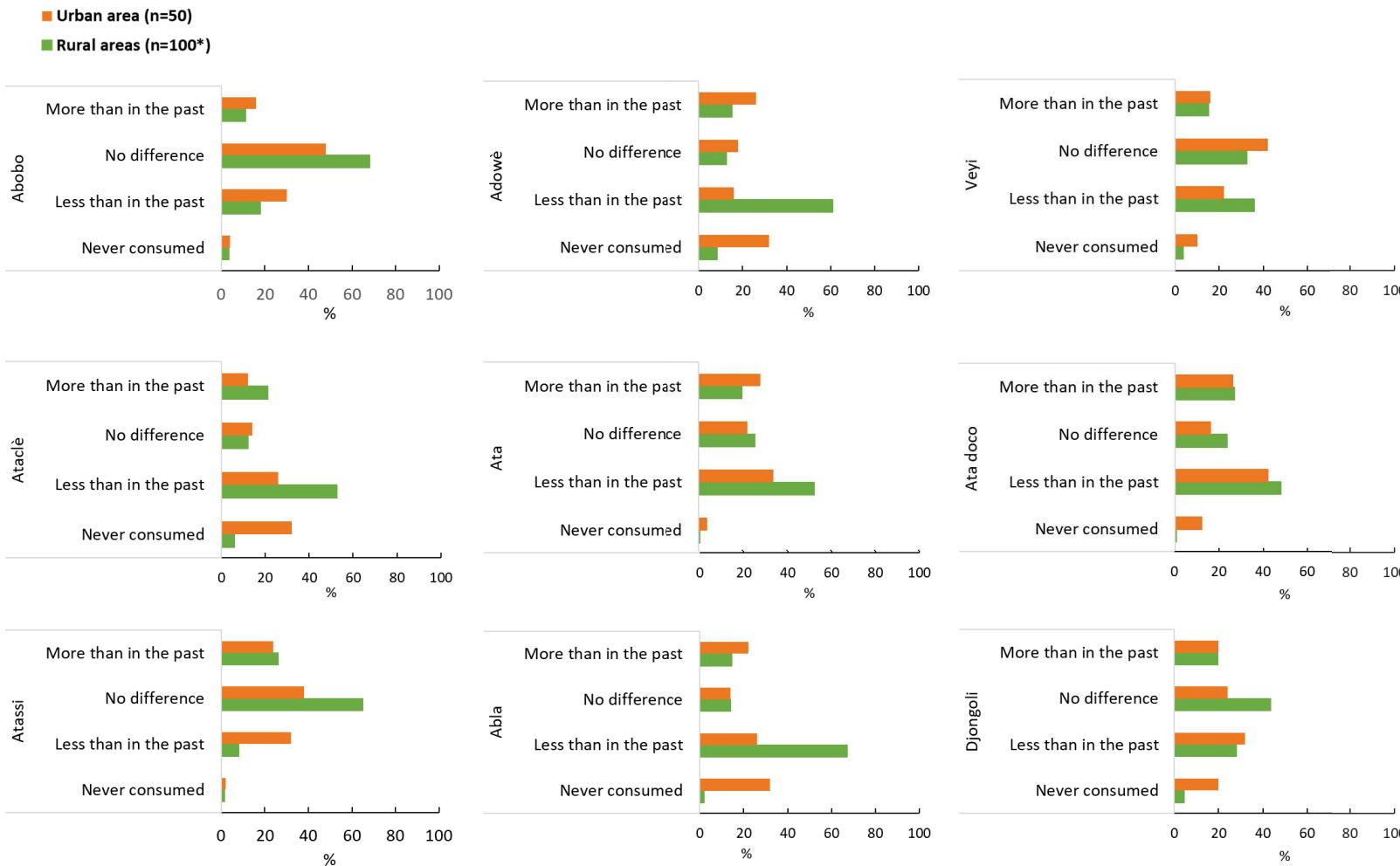


Fig 3. 1 : Evolution over time in the consumption of cowpea based dishes in Cotonou and rural areas

*: 50 participants were interviewed in each rural area

Government projects should promote cowpea production by helping the farmers to face some constraints like soil degradation and post-harvest damages. Examples could be taken from others studies to define the solutions to face the lack of knowledge about traditional recipes. To promote plant foods consumption, Lea *et al.*, (2005) reported that media advertising (magazines, newspapers, TV cooking programs), food outlets (recipe cards), and cookbooks were the main sources of information used by the Australian population.

Adoption of these recommendations could help to maintain the high level of cowpea consumption observed in our study.

5. Conclusion

Positive perceptions of the consumers were observed concerning the health effect of cowpeas. The limits to cowpea consumption were either specific to the traditional recipes — lack of knowledge and problem of availability — or general — digestive problems —. Recommendations were provided to face some barriers related to the consumption of traditional cowpea recipes. To maintain cowpea consumption, actions should be done by all the stakeholders at all stages. One strategy is to promote cowpea-based foods by raising awareness regarding their nutritional benefits. Therefore, it is crucial to carry out a study to characterize the nutritional value of these dishes and determine their contribution to the recommended daily intake.

Funding

This work was carried out in the framework of the projects ICOWPEA and TransNut-Niébé funded by the French government through the French National Research Agency (ANR) under the “Investissements d’avenir” program with the references ID1507-031 (Grant number: ANR-10-LABX-0001-01; Agropolis Fondation) and ANR-16-IDEX-0006 (I-Site MUSE), respectively.

Acknowledgments

The authors wish to thank the participants to this study and the local authorities for their cooperation.

3.1.2. Synthèse et perspective

Les résultats issus de ces travaux ont montré une forte consommation du niébé par la population tant à Cotonou que dans les zones rurales étudiées (seulement 5 à 10% de non-consommateurs au cours de la semaine précédent les enquêtes FFQ). Concernant les modes de consommation du niébé, nous avons observé que certains plats traditionnels étaient très consommés comparativement à d'autres. Par exemple 71 à 79 % des consommateurs de niébé (n=626 à Cotonou et n=565 dans les zones rurales étudiées) ont consommé le plat mixte Atassi au cours de la semaine précédent les FFQ tandis que 5 à 15% ont consommé le plat Abla. Les raisons de ces différences de consommation entre les plats étaient la méconnaissance de certaines recettes traditionnelles, de la non-disponibilité de certains plats en tant que restauration de rue, la préférence d'autres aliments, le temps de préparation long, et les inconforts digestifs. Une conséquence de la moindre consommation de certains plats serait que les plats traditionnels les plus consommés pourraient présenter un faible potentiel nutritionnel.

Au cours des discussions de groupes, les participants ont affirmé que les quantités de graines de niébé consommées par les générations dans le passé (lorsqu'ils étaient enfants soit il y a environ 20-50 ans) étaient élevées par rapport à la consommation actuelle.

Dans la suite de l'étude, nous avons donc cherché à évaluer les quantités de niébé consommées par les adultes de Cotonou et des zones rurales étudiées et à estimer la contribution nutritionnelle de ces plats traditionnels aux apports journaliers recommandés.

Les résultats sont présentés dans la publication 2.

3.2. Contribution nutritionnelle des plats traditionnels de niébé

Les méthodes relatives à l'évaluation de l'apport nutritionnel des aliments jouent un rôle important dans la définition de stratégies visant à limiter les prévalences des maladies chroniques liées à l'alimentation. Le niébé présentant des avantages sur le plan nutritionnel (Tab 1.1, chapitre 1), sa consommation pourrait participer à la prévention de ces problèmes nutritionnels ou de certaines carences en micronutriments. Cependant, les méthodes traditionnelles de transformation de cette graine pourraient entraîner une diminution de la valeur nutritionnelle des plats. Cette partie de l'étude a donc consisté à évaluer la consommation actuelle des plats traditionnels de niébé en vue d'estimer leur part de contribution à la satisfaction des apports journaliers recommandés.

Dans un premier temps, nous avons réalisé des enquêtes de fréquences de consommation des plats de niébé dans trois communes (urbaine et rurale) localisées dans le sud du Bénin. Dans un second temps, la composition nutritionnelle de ces plats a été déterminée à travers des analyses de laboratoire d'échantillons collectés sur le terrain. Les composés contenus dans la graine de niébé et présentant un fort intérêt nutritionnel (fibre, protéine, minéraux, folates et thiamine) ont été sélectionnés pour réaliser cette étude.

Les résultats de cette partie sont présentés sous forme d'article et abordent ces principaux points :

- Détermination des fréquences de consommation et quantités consommées des plats de niébé
- Estimation de la quantité moyenne de graines de niébé consommée par personne
- Estimation de la contribution à la couverture des apports nutritionnels recommandés en certains nutriments des plats de niébé

3.2.1. Publication 2: Current consumption of traditional cowpea dishes in South Benin contributes to at least 30% of recommended intakes for dietary fibre, folate and magnesium

For supplementary material, see “Annexe 5”

Statut : En préparation pour soumission au journal Public Health Nutrition

Abstract

Objective: To characterize the consumption pattern of cowpeas, the main pulse in West Africa, and to determine the nutritional composition of main cowpea dishes to estimate their contribution to recommended nutrient intakes in adults.

Design: A one-week retrospective Food Frequency Questionnaire (FFQ) was used and portion size estimated using a validated food atlas. The nutritional composition (proximate composition, minerals, folate and thiamine) was determined in nine traditional cowpea dishes, sampled from 27 street food vendors in Cotonou. Using the daily intake during the FFQ week and the nutrient contents, the contribution of cowpea dishes to the Recommended Nutrient Intakes (RNI) was calculated.

Settings: Three areas in the south of Benin: Cotonou, an urban area, and Adjohoun and Allada, two rural areas with high and low cowpea production respectively.

Subjects: 1217 19-65-year-old men and women.

Results: 98% respondents declared consuming cowpea. Among those who had consumed cowpea during the FFQ week, the average frequency of consumption varied from 0.1 to 2.4 times/week according to the dish. This corresponded to mean total quantities of cowpea seeds consumed of 71 and 58 g seeds/adult/day in rural and urban areas respectively. The average total daily contribution of the cowpea dishes to RNI was around 15% for energy, 40% for dietary fibre, 26% for protein, around 30% for magnesium and folate, and between 10% and 20% for zinc, potassium, thiamin.

Conclusion: The current level of consumption of cowpea by the population of the study areas is high and significantly contribute to some important nutrient intakes. The population should be encouraged to maintain such regular consumption.

Keywords: Pulses, food atlas, FFQ validation, traditional dishes

1. Introduction

The increasing industrialization and urbanization occurring in many countries around the world are associated with “nutrition transition” with diets richer in fat and sugars, and more sedentary lifestyles(WHO-FAO, 2003). As a consequence, the prevalence of overweight and obesity and related chronic diseases in those countries is increasing year after year (Abrahams *et al.*, 2011). In Benin, the prevalence of diabète was 7% in 2014, the percentage of raised blood pressure among adults was 28% in 2015, and in 2016, the prevalence of obesity ($BMI \geq 30$) was 23% and 6% for women and men respectively (NCD-RisC, 2020). Among 18-49 year-old women , the prevalence of anaemia between 2017 and 2018 was estimated at 58% with 30% and 2% presenting moderate and severe anaemia respectively (INSAE and ICF, 2019). Strategies are thus needed to prevent these non-communicable diseases related to diet. To this purpose, the consumption of some recommended food groups such as pulses should be encouraged for their multiple well-recognized health benefits (O’Broin and Tucci, 2016). Indeed, pulses are particularly interesting to fight against the double-burden of malnutrition (Jones and Ejeta, 2016), as they are rich in some nutrients of interest on one side, and rich in bioactive compounds on the other side (Maphosa and Jideani, 2017). Regarding their nutritional value, pulses are an important source of dietary protein with a good amino acid profile complementary to that of cereals. They are rich in some minerals (particularly magnesium, potassium, zinc, and sometimes also considered rich in iron) (Boye *et al.*, 2010) and vitamins (E, B-group) (Gonçalves *et al.*, 2016). They have low a fat content (Ojwang *et al.*, 2013) and provide large amounts of dietary fibre and bioactive compounds of various chemical nature, known to play a role in the prevention of metabolic disorders. Several studies have suggested that the consumption of legumes could help to lose weight, which could be attributed to their low fat and high dietary fibre contents (Maphosa and Jideani, 2017). Pulse-based foods have low glycaemic index values, which is recommended for people suffering from type 2 diabetes(Jenkins *et al.*, 2012). Moreover, regular consumption of pulses helps to reduce LDL cholesterol levels and lower blood pressure (Ha *et al.*, 2014).

Cowpea (*Vigna unguiculata [L.] Walp*) is the best known pulse in sub-Saharan Africa. Cowpea seeds have an interesting nutritional composition with protein contents ranging from 22 to 30 g/100 g (Madode *et al.*, 2012). The dietary fibre contents of cowpea seeds range from 16 to 21 g/100 g, and they are an important source of B-group vitamins (niacin, pantothenic acid,

thiamine, pyridoxine, folic acid, riboflavin, biotin) and also claimed as an interesting source of minerals (iron, calcium, zinc, and potassium) (Gonçalves *et al.*, 2016). However, the nutrition transition that involved a progressive shift from a traditional, high-fibre, low-fat, low-sugar diet to a diet rich in refined, low-fibre, high-fat, high-salt and high-sugar foods (Delisle *et al.*, 2012), together with the presence of anti-nutritional factors that cause intestinal disorders, could lead to a shift away from traditional cowpea dishes. In addition, the nutritional composition could be affected by processing as reported for the traditional processing of cowpeas into Ata and Ata-doco, two cowpea-based doughnuts consumed in Benin (Akissoé *et al.*, 2021), leading to a reduction of their contribution to nutritional requirements.

In Benin, Madode *et al.*, (2011) investigated ten years ago, the patterns of consumption of ten cowpea dishes (out of 18 identified as available in the south of the country) and their qualitative frequency of consumption (regularly, often, and occasionally). These latter authors showed that among those traditional cowpea dishes, three were the most consumed – Ata (doughnuts), Abobo (stew), and Atassi (cowpeas and rice) – and determined some nutritional traits of the dishes. However, data about quantities of dishes consumed were lacking to allow the evaluation of their contribution to recommended nutrient intakes (RNIs). The aim of our study was first to make an update of the cowpea consumption pattern in South Benin, and then to determine precisely the quantities of cowpea dishes consumed daily by Beninese adults to estimate their nutritional intakes. Among the eighteen cowpea dishes previously identified by Madode *et al.*, (2011), the nine currently most popular were selected for our purpose. These dishes can be classified into three groups: doughnuts (Ata, Ata-doco, Ataclè), mixed dishes (Abla, Atassi, Djongoli), and stews (Adowè, Abobo, Vêyi). We first carried out a food consumption survey using a Food Frequency Questionnaire (FFQ) – that we first validated– among 1217 adults in an urban area (Cotonou) and two rural communes (Adjohoun, Allada) in the south of Benin. Then, the nine dishes were sampled from street food vendors in Cotonou, and their nutritional value (proximate composition, minerals, folate, thiamin) and contents in compounds with antinutritional activity (phytate and alpha-galacto-oligosaccharides) were determined through laboratory analyses. Using data from FFQ and the nutritional composition of the dishes, we determined their contribution to RNIs for the nutrients and compounds mentioned above among 19-65-year-old adults.

2. Materials and methods

2.1. Consumption survey of cowpea using FFQ

2.1.1. Study areas and cluster sampling

The study was conducted in three different localities in South Benin (communes): Cotonou, an urban area of around 680 000 inhabitants in 2017, and Adjohoun and Allada, two rural areas of respectively around 75 000 and 128 000 inhabitants early in 2019. In Benin, communes are subdivided into administrative units called arrondissements, which in turn contain villages or neighborhoods. Adjohoun is located in the department that produce 65% of the total cowpea production from Benin (Kossou *et al.*, 2001), while Allada is in a low-production area. In each study area, a representative two-stage random sampling was carried out by considering neighborhoods or villages as clusters (Fig 3.2). The first stage sampling consisted of the selection of two or three clusters per arrondissements using random numbers generated by Excel software. At the second stage, a random direction was chosen by the pen spinning method at the center of each cluster for household selection. One adult aged between 19 and 65 years was interviewed in each selected household. An equal number of men and women was selected by cluster. The sample size was chosen based on previous studies that used the FFQ method in Africa (Mchiza *et al.*, 2015). In Cotonou, 641 adults were surveyed and 576 in Adjohoun and Allada (288 respondents per rural area).

2.1.2. Development of the cowpea dish atlas

The food atlas was developed following the practical guidelines proposed by Nelson and Haraldsdóttir (1998). It was developed for all the nine cowpea dishes, which are described in table 1S (supplemental material) and presented in photos in the figure.1S (supplemental material). For each cowpea dish, photos of four portion sizes were presented in the food atlas (Figure 2S, supplementary data). The photos were shot at street vendors, on portions corresponding to the four best-selling prices per cowpea dish. The determination of these prices was made as follows: the fieldworkers recorded the consumers' purchase prices at different selling places. For each best-selling price, portion sizes were weighed at several selling places. The average value was used as the portion size.

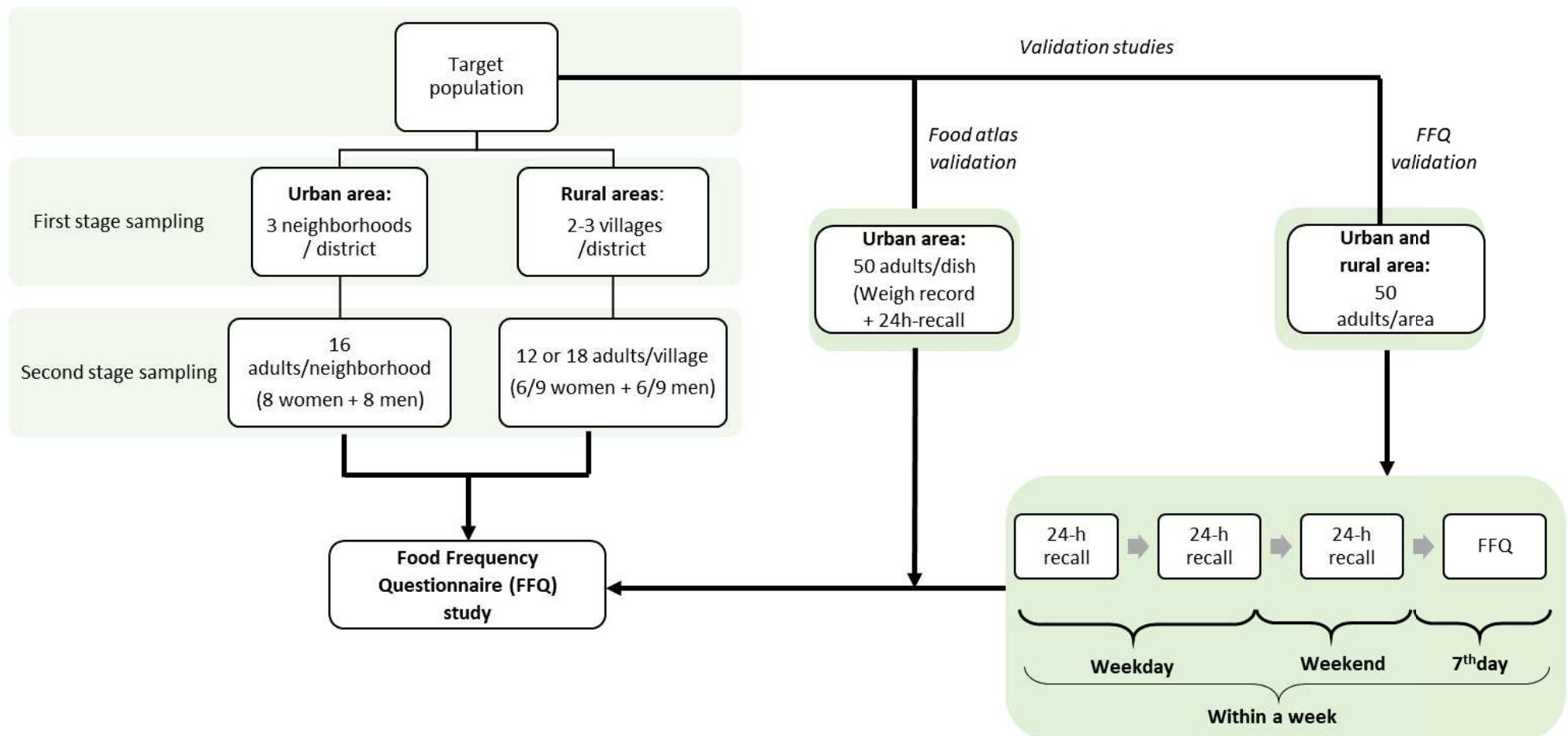


Fig 3. 2 : Scheme of the survey design

For each cowpea dish, there were nine possible choices as portion sizes, with four presented as photos in the food atlas (B,D,F,H) and five non-presented intermediate portion sizes (A,C,E,G, and H) (Figure 2S, supplementary data). This allowed the coverage of a wide range of cowpea dish portions, which could be consumed by the participants.

2.1.3. Validation studies

2.1.3.1. Food atlas validation

A study was performed in Cotonou to compare the portions sizes chosen by respondents in the food atlas to the weighed records. A convenient sample size of 50 customers of street food vendors per cowpea dish was initially targeted. But finally, the number of people actually surveyed varied between 19 and 52 respondents per cowpea dish due to high differences in the presence of street vendors of some dishes, and then in the number of customers. The study was performed on two days at various selling places for each cowpea dish. On the first day, the quantity of the cowpea dish consumed by the respondent was weighed using a kitchen scale (Soehnle, weighing capacity 5 kg, 1 g of precision). An appointment was made on the following day to perform a 24h recall (Fig 3.2) using the food atlas. The respondents were not informed that the portion size consumed the day before would be asked on the next day.

2.1.3.2. FFQ validation

The validation of the food frequency questionnaire was carried out on a sample of 50 respondents in each of the three study areas. Briefly, three 24-hour recalls were carried out over the same week with two recalls during the weekdays and one the weekend, followed by a FFQ at the end of the week (Fig 3.2). The usual portion size determined with the FFQ data was then compared to the average of the estimated weights during the three 24 h recalls.

2.1.4. FFQ

The FFQ consisted of two parts: one for the characterization of the socio-economic index of the household with questions about the socio-professional characteristics of the head of the household, the household income and expenses (feeding and clothing), the properties owned by the household, and the characteristics of the household's dwelling.

The second part was about the consumption and estimation of the quantities of cowpea dishes consumed over one week. First, general questions were asked about the consumption of various legume consumption species. Secondly, data about the types of cowpea dishes consumed by the respondent during a retrospective period of one week (named FFQ week thereafter), and the number of times and place of consumption were asked collected. For each cowpea dish, the quantity usually consumed was estimated using the food atlas presenting photos of portion sizes.

2.1.5. Data collection

Data were collected using surveyCTO™ generated excel forms on digital tablets to allow quick and correct transfer to the SurveyCTO platform.

For the FFQ validation study, data were collected on paper forms and then entered into Epidata software (version 3.1).

2.1.6. Ethical considerations

The National Committee of Ethics for Health Research of Benin approved the surveys in Cotonou and in the rural areas after the research protocol examination. All respondents gave their signed consent to participate before the start of each interview. The anonymity of the respondents was respected and this was attested on the consent form.

2.2. Sampling of cowpea dishes and analyses of their nutritional composition

2.2.1. Cowpea food sampling

Each of the nine cowpea dishes was sampled in three street food vendors in Cotonou, transported to the laboratory in a cooler containing ice and placed in the freezer at -20°C until analysis.

2.2.2. Nutritional composition analysis

Proximate composition. Lipid, protein, ash, and dry matter contents of the cowpea dishes were determined by standard methods (AOAC, 2006). Total dietary fiber (TDF) was determined using an enzymatic-gravimetric method (Megazyme K-TDFR Kit) as described by Njoumi et al., (2019). Available carbohydrates were determined by difference: [100 - (Water content + Lipid + Protein + Ashes + TDF)]. Energy was determined by calculation using Atwater coefficients (FAO, 2003).

Micronutrients. Total iron, zinc, calcium, potassium and magnesium contents were extracted with a closed-vessel microwave digestion system (ETHOS-1, Milestone, Italy) (Icard-Vernière et al., 2013). Extracts were then analyzed by optical emission spectrometry using an ICP-OES 5100 apparatus (Agilent Technologies, Les Ulis, France). Total folate was analyzed by trienzymatic extraction followed by microbiological assay using *Lactobacillus rhamnosus* ATCC 7469 as the growth indicator microorganism (Bationo et al., 2019b). Total thiamin was determined by chromatographic analysis using Waters AcquityTM Ultra Performance LC (UPLC) system (Waters, Milford, MA, USA) equipped with an AcquityTM fluorescence (FLR) detector, and an Acquity UPLCTM column using a method adapted from Schmidt et al., (2017)

Others. Phytic acid (IP6) content was determined as described by Lestienne et al., (2005) using high-performance anion-exchange chromatography (Dionex, Sunnyvale, CA, USA). Alpha-galacto-oligosaccharide contents were determined using the method described by Akissoé et al., (2021).

2.3. Calculation and statistical analyses

2.3.1. Analysis of FFQ validation studies

For both validation studies, Spearman's correlation tests were performed after checking the normality of the data. The concordance between the two methods was also assessed using the Bland-Altman test. For this, data were log-transformed (Bland and Altman, 1986). This operation enabled to narrow the limits of agreement (LOA). The antilogarithms of the LOA were calculated to obtain a ratio of "24h recall over weighed record" and "usual portion size from FFQ over mean of the three 24 hour recalls" for food atlas and FFQ validations

respectively. The ratios were multiplied by 100 and then expressed as percentages of agreement (Villegas *et al.*, 2007).

2.3.2. Determination of the socio-economic index (SEI)

The household socio-economic index (SEI) was determined separately for the rural and urban populations by considering variables related to socio-economic characteristics (see section 2.1.4). A multiple correspondence analysis (MCA) with the selected variables was performed using Rstudio software (version 3.5.1). The axis that explained higher inertia was chosen and an ascending hierarchical classification (AHC) with the coordinates of the individuals on this axis was performed. A partition of the dendrogram obtained after the AHC allowed generating socio-economic classes.

2.3.3. Estimation of the nutritional contribution

The nutritional contribution was determined using the daily quantity consumed for each traditional dish during the FFQ week, which was estimated with the usual portion size and the daily frequency of consumption (weekly frequency divided by 7). For all the respondents, the daily intake of the nutrients were calculated and compared to the average of the recommended nutrient intakes for men and women. The reference values provided by FAO and WHO, (2004, 2007) were used for minerals and vitamins and for protein requirements, and by ANSES, (2016) for dietary fibre (table 2S supplemental material). The daily nutrient intakes calculated as the nutrients contained in a usual portion size multiplied by the daily frequency) were compared to the reference values to obtain the nutritional contributions, which were expressed in percentages.

2.3.4. Determination of nutritional scores of cowpea dish combination consumed during the FFQ week

To determine the nutritional scores, we used the different combinations of cowpea dishes consumed by the respondents during the FFQ week and then we calculated for each nutrient, the sum of the nutritional contribution (SNC) provided by the dishes of the different combinations. This allowed us to generate a data frame with the cowpea dish combinations as individuals and the SNCs as variables (for dietary fibre, protein, Ca, Fe, Zn, Mg, K, thiamine,

folate; making nine variables in total). Using this data frame, we performed a principal component analysis (PCA). The coordinates of the individuals on the first axis, which explained higher inertia was used as nutritional scores. Moreover, an AHC was performed to determine nutritional classes.

2.3.5. Calculation of weighting coefficients for statistical analysis

The number of neighborhoods/villages or their population density may vary from an arrondissement to another. Therefore, a design weight that corresponds to the representativeness of each neighborhood/village in its cluster was calculated and applied to each respondent. The design weight (D_w) is defined as the inverse of the probability to include a respondent in the sample (Delisle *et al.*, 2012). In our study, considering the two-stage random sampling method used (Fig 3.2), the design weight corresponds to the product of the inverse of the probabilities of each stage. These probabilities were calculated using following equations:

- First stage: sampling of neighborhoods or rural villages in the arrondissement

$$P_{1i} = \frac{\text{Number of neighborhoods or villages selected for the FFQ}}{\text{Total number of neighbourhoods or villages in the arrondissement}}$$

- Second stage: sampling of the subjects in the neighborhoods or the rural villages

$$P_{2i} = \frac{\text{Number of subjects selected in the neighborhood or village}}{\text{Eligible adult population of the neighborhood or village}}$$

The formula to determine the design weight (D_{wi}) per respondent (i) was then:

$$D_{wi} = \frac{1}{P_{1i} * P_{2i}}$$

To perform the statistical analysis with a weighting factor corresponding to the actual size of the population sampled (N), a weighed design weight (WeD_{wi}) was calculated for each respondent as follows:

$$WeD_{wi} = \frac{D_{wi} * N}{\sum_{i=1}^{N^{\text{th}}} D_{wi}} ; \text{ with } \sum_{i=1}^{N^{\text{th}}} WeD_{wi} = N$$

The weighting was realized for urban and rural data separately to perform statistical analysis per area.

2.3.6. Statistical analyses

Data were analyzed with Rstudio software (version 3.5.1).

The weighting variables were used as a correction factor for statistical analyses using the package "Survey". To identify the factors (SEI, sex, age, education level, place of living) influencing the quantity of cowpeas consumed, general linear models (GLM) adapted to weighted data were used. One factor analysis of variance, t-tests, and chi-2 tests were also performed. The level of statistical significance was set at $p < 0.05$.

3. Results

3.1. Validation of the food frequency questionnaire

The comparison of the portion sizes in the food atlas using a 24h recall and the weight record methods showed Spearman correlation coefficients ranging between 0.2 and 0.8 (Table 3S, supplemental material). The usual portion size consumed within a week estimated with the FFQ compared with the average of three 24h recalls showed correlation coefficients of at least 0.4 for all dishes except for Ataclè and Abla where there were not enough respondents to establish a statistical relation. Moreover, on average, the 24h recall showed percentages of concordance with the weight record method ranging between 74 and 128% (except for Vêyi, 162% due to the way of consumption, together with other foods) while the FFQ method represented 66 to 96% of the 24h recall based on the Bland-Altman test.

3.2. Socio-economic and demographic characteristics of the FFQ respondents

The mean age of the respondents was 39 years and 36 years in Cotonou and the rural areas respectively (table 3.5). Given that weighed data were used, some little differences were observed between the sample sizes of women and men – which were normally equals – interviewed in both types of areas. Based on the socio-economic characteristics of the household, three different classes of SEI (low, middle, and high) were determined per area. The level of education was significantly higher in Cotonou than in the rural areas, with close to half of the participants who never went to school and a very low proportion of respondents who reached higher education level.

Tab 3. 5 : Socio-economics status and characteristics of the participants

Characteristics	Urban area (N=641)	Rural area (N=576)	<i>P-value</i>
	% (n)	% (n)	
Age			
<27 years	27 (171)	18 (105)	
27-34 years	26 (169)	21 (119)	NS*
35-44 years	22 (139)	25 (145)	
45-65 years	25 (162)	36 (207)	
Mean ± SE	39.2 ± 0.7	35.7 ± 0.6	
Sex			
Men	51 (324)	49 (285)	
Women	49 (317)	51 (291)	NS*
SEI urban area (SEI 1)			
Low [0.4 ≤ Score < 1.2] ¹	31 (200)	-	
Middle [1.2 ≤ Score < 1.8]	43 (276)	-	NA
High [1.8 ≤ Score < 3.0]	26 (166)	-	
SEI rural area (SEI 2)			
Low [0.1 ≤ Score < 1.3]	-	34 (198)	
Middle [1.3 ≤ Score < 1.8]	-	35 (202)	NA
High [1.8 ≤ Score < 3.1]	-	31 (176)	
Education			
None	16 (101)	45 (256)	
Primary school	28 (177)	29 (168)	
Secondary school	36 (229)	24 (138)	<0.001*
Higher education	21 (133)	2 (14)	

NA: Not applicable; NS: Not significant; SE: Standard error; SEI: Socio-Economic Index

Values are obtained using weighted data

% (n): Percentage (sample size per group)

¹: Values into [] are the SEI scores and corresponded to the coordinates of the subjects on the 1st axis of the Multiple Correspondence Analysis (MCA)*: χ^2 test for differences between urban and rural area**: χ^2 test between the two rural areas for socio-economic status

3.3. Consumption of cowpea dishes

Nearly all respondents (98%) reported consuming cowpea on a regular basis and more than 70% at least once a week (Tab 3. 6). 90% and 95% of people surveyed in Cotonou and in the rural areas reported to have consumed at least one cowpea dish during the FFQ week.

Tab 3. 6 : Percentages of people consuming cowpea and frequency of consumption in Cotonou and surveyed rural areas

Consumption	Urban (N=641)		Rural (N=576)		p-value¹
	%	N	%	N	
Usually	98	626 [§]	98	565 [§]	Ns
< 1 time/month	8		6		<0.001
1-3 times/month	5		23		
≥ 1 time/week	87		71		
FFQ week	90	578 ^{§§}	95	545 ^{§§}	0.005

[§]: Size of cowpea consumers

^{§§}: Size of consumers during the FFQ week

¹: χ^2 test for differences between urban and rural area

Concerning the consumption of cowpea dishes, the mixed-dish Atassi and the stew Abobo were the most consumed during the week preceding the FFQ survey in all study areas (table 3.7). The results also showed some variations in the patterns of cowpea consumption depending on the area. Except for the dishes Atassi and Attaclé, significant differences were observed for the number of consumers between the urban and rural areas with Ata, Véyi, and Adowè that were more consumed by the respondents in the urban area, whereas the number of consumers of Ata-doco, Abla and Djongoli in the rural areas were twice higher than in the urban area. For Abobo, the proportion of the weekly consumers in the rural areas was 11% higher than the urban area.

The number of different of cowpea dish combinations consumed during the FFQ week reached 113 and 102 in urban and rural areas respectively. In the rural areas, the most consumed combination was Abobo and Atassi (18% of the consumers) while in the urban area the most consumed was Ata, Abobo, and Atassi (11% of the consumers).

3.4. Frequency of consumption of cowpea dishes and quantities consumed

Table 3.7 shows that, among the people who said they had consumed the cowpea dishes during the FFQ week, the average number of times of consumption were significantly different between Cotonou and rural consumers, except for Atassi, Abobo, and Djongoli. The frequencies varied between 1.4 and 3.1 times per week, depending on the dish. However, when the people who said they did not consume these dishes during the FFQ week were taken into account, the average frequency of consumption varied between 0.1 and 1.5 for most of the dishes, except for Abobo and Atassi, which were consumed on average 1.9 to 2.4 times during the FFQ week. Based on these average frequency values of each dish, the total frequency of consumption of at least one cowpea dish was estimated at around 7 times per week – sum of numbers of time the dishes were consumed by all cowpea consumers – in Cotonou and the study rural areas

Concerning the average portion sizes, table 3.7 shows that the dishes Abobo, Atassi and Djongoli were consumed in quite large quantities (272 to 311 g/meal), when consumed. The doughnuts (Ata, Ata-doco and Ataclè) and the Adowè mash were consumed in smaller portions.

Among all the survey participants, the average daily intakes of Adowè, Ata, Ata-doco, and Vêyi were significantly higher in the urban area compared with the rural areas while the average intakes per day for Atassi and Djongoli were lower.

When daily intakes of the cowpea dishes were converted into “cowpea seed equivalent” (Table 3), the average total quantity of cowpea seeds consumed was 71 g and 58 g cowpea seeds (DM) per day in Cotonou and rural areas respectively ($P<0.05$). Significant differences were observed between both types of areas concerning the daily quantity of cowpea seeds consumed from most of the cowpea-based dishes except for Abla and Abobo.

Some associations were observed between socio-economic and demographic factors and i) the daily quantities consumed for the nine dishes, or ii) the total cowpea seed intake (table 4S, supplementary data). The effect of different factors was observed on the daily intake of each cowpea dish consumed in both types of areas.

Tab 3. 7 : Quantities of cowpea dishes consumed (g, fresh weight) and cowpea seeds (g, fresh weight) in Cotonou and the rural study areas

		Stews			Doughnuts			Mixed dishes			
		Area	Abobo	Vêyi	Adowè	Ata	Ata-doco	Ataclè	Atassi	Abla	Djongoli
Consumers during the FFQ week (i.e. people who said they had consumed the dish during the week preceding the survey)	Number of consumers	<i>p-value</i> ¹	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	ns	ns	<0.001	<0.001
	Cotonou (n=578)		441	142	150	350	92	38	444	30	95
	Rural (n=545)		496	77	35	122	188	35	440	85	213
	Number of times of consumption during FFQ week ‡	<i>p-value</i> ²	Ns	<0.001	0.008	<0.001	<0.001	<0.001	ns	0.002	ns
	Urban		2.8	2.5	2.4	2.7	2.8	2.4	2.9	2.3	2.0
	Rural		2.6	1.8	1.7	2.0	2.0	1.4	3.1	1.5	2.2
	Usual portion size per meal (g) ‡	<i>p-value</i> ²	0.02	Ns	Ns	<0.001	<0.001	0.001	ns	ns	0.04
	Urban		298.9	235.7	65.4	162.3	291.7	211.4	296.7	231.3	284.1
	Rural		273.4	258.5	80.4	116.8	98.2	102.9	305.1	216.3	311.3
	Intake (g of dish/day) ‡	<i>p-value</i> ²	0.02	0.005	Ns	<0.001	<0.001	0.004	ns	0.05	0.02
	Urban		121.4	86.9	23.1	65.2	119.5	59.2	127.1	92.1	81.6
	Rural		106.0	65.5	20.6	34.3	29.8	23.2	136.8	47.9	99.0
All participants\$	Number of times of consumption during FFQ week ‡	<i>p-value</i> ²	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.003	ns	0.008	0.01	<0.001
	Urban		1.9	0.6	0.6	1.5	0.4	0.1	2.1	0.1	0.3
	Rural		2.3	0.2	0.1	0.4	0.7	0.1	2.4	0.2	0.8
	Intake (g of dish/day) ‡	<i>p-value</i> ²	Ns	<0.001	<0.001	<0.001	0.02	ns	0.01	ns	<0.001
	Urban		85.5	19.7	5.6	36.5	17.5	3.6	90.2	4.4	12.4
	Rural		93.0	8.9	1.3	7.4	9.9	1.4	106.3	7.2	37.4
	Equivalent cowpea seeds £ (g, per day) ‡	<i>p-value</i> ²	Ns	<0.001	<0.001	<0.001	0.02	0.04	0.01	ns	<0.001
	Urban		26.9	7.4	1.7	14.4	7.7	2.3	7.8	0.5	2.2
	Rural		29.3	3.4	0.4	2.9	4.4	0.7	9.2	0.9	6.5

All values were obtained using weighted data. n: number of cowpea consumers during the FFQ week. ¹: χ^2 test for differences between urban and rural area; ²: One factor analysis of variance. \$: All the respondents in each area excluding non-consumers of cowpea seeds. ‡: Values are means. £: Quantity calculated by taking into account the proportion of cowpea in the dish and the processing yield.

By focusing on the quantity of cowpea seeds consumed, we found that in the rural areas, the daily quantity was lower in Allada compared with Adjohoun consistently with the local level of production. The total daily cowpea intake was significantly lower among women compared with men. The influence of the SEI was also observed with the high SEI class consuming a lower quantity of cowpea seeds compared with the low and middle SEI classes. In Cotonou, the daily intake of cowpeas was lower for the respondents with higher education level compared with other groups. Moreover, the influence of the sex was observed with the quantity of cowpea seeds consumed by women, lower than the average quantity consumed by men in both areas.

3.5. Nutritional composition of traditional cowpea dishes

Table 3.8 presents the proximate composition, mineral, folate, and thiamin contents of the traditional cowpea dishes as consumed. Very high and significant variations from a dish to another ($P<0.05$) were observed for all the nutrients determined in the foods: protein (3-10 g/100 g), dietary fibre (3-7 g/100 g), lipid (0.2-37 g/100 g) magnesium (13-68 mg/100g), potassium (90-500 mg/100 g), zinc (0.3-1.6 mg/100 g), iron (0.4-8 mg/100 g), thiamin (28-175 µg/100 g) and folate (12-84 µg/100 g). In addition, for each dish, significant differences were also observed depending on the producer, for most of the nutrients (Table 5S, supplementary data).

The doughnuts showed high-fat contents compared with other dishes and consequently, they showed higher energy values compared with other groups.

When the energy value of each dish is taken into account to calculate the nutritional density (Table 6S, supplementary data), the stews present an interesting nutritional profile compared with other cowpea dish groups.

Alpha-galacto-oligosaccharide and phytate contents — compounds exhibiting anti-nutritional activity— were significantly different by considering each group of cowpea dishes. On average, the doughnuts presented higher contents compared with the other groups (Table 7S, supplementary data).

Tab 3. 8 : Nutritional composition of cowpea dishes (per 100g of edible portion)

	Dishes	Water (g)	Protein (g)	Fat (g)	Available carbohydrate (g)	Dietary fibre (g)	Ash (g)	Energy (kcal)	Fe (mg)	Zn (mg)	Ca (mg)	Mg (mg)	K (mg)	Folate (µg)	Thiamin (µg)
<i>Stews</i>	Abobo	71.6 ± 2.9	6.3 ± 0.7	0.5 ± 0.0	14.3 ± 2.6	5.8 ± 0.2	1.5 ± 0.4	98 ± 13	1.4 ± 0.3	0.9 ± 0.2	30.3 ± 5.8	39 ± 7.8	272 ± 51	56.2 ± 4	43.5 ± 13
	Vêyi	66.1 ± 2.6	7.5 ± 0.4	0.6 ± 0.1	16.7 ± 2.0	7.2 ± 0.4	1.9 ± 0.3	116 ± 9	1.5 ± 0.1	1.1 ± 0.1	27.9 ± 4.8	46 ± 3.6	323 ± 39	80.5 ± 7	89.6 ± 42
	Adowè	73.2 ± 3.4	6.3 ± 1.2	0.4 ± 0.2	13.7 ± 2.5	5.0 ± 0.3	1.5 ± 0.1	94 ± 14	1.1 ± 0.2	0.9 ± 0.2	25.7 ± 7.5	36 ± 4.2	258 ± 37	65.1 ± 22	28.4 ± 21
<i>Doughnuts</i>	Ata	47.6 ± 5.7	7.4 ± 0.5	19.5 ± 7.5	18.7 ± 1.7	4.7 ± 0.3	2.0 ± 0.2	289 ± 61	4.2 ± 0.4	1.2 ± 0.1	28.2 ± 7.6	50 ± 1.4	333 ± 19	74.3 ± 19	133.3 ± 18
	Ata doco	44.3 ± 5.9	8.8 ± 1.0	16.5 ± 7.2	21.9 ± 1.1	6.2 ± 0.4	2.2 ± 0.4	284 ± 60	4.1 ± 1.2	1.5 ± 0.1	27.9 ± 4.8	61 ± 5.2	425 ± 56	64.0 ± 18	135.8 ± 26
	Ataclè	23.9 ± 2.6	9.9 ± 0.3	33.3 ± 3.8	23.9 ± 1.6	7.0 ± 0.5	2.2 ± 0.2	449 ± 29	8.0 ± 6.8	1.6 ± 0.2	33.4 ± 7.3	68 ± 5.6	500 ± 31	84.3 ± 22	174.9 ± 23
<i>Mixed cowpea-cereal dishes</i>	Atassi	68.9 ± 1.3	3.0 ± 0.1	0.7 ± 0.4	23.7 ± 0.8	2.7 ± 0.2	1.0 ± 0.1	119 ± 7	0.4 ± 0.1	0.3 ± 0.1	8.2 ± 2.2	13 ± 4.2	90 ± 27	12.2 ± 3.2	34.3 ± 5
	Abla	66.1 ± 3.5	3.6 ± 0.9	10.2 ± 1.5	13.6 ± 2.5	5.1 ± 0.4	1.3 ± 0.3	171 ± 17	3.0 ± 1.6	0.7 ± 0.1	25.0 ± 2.1	39 ± 1.4	167 ± 51	40.3 ± 17	50.3 ± 7
	Djongoli	63.5 ± 5.3	4.2 ± 1.2	7.2 ± 2.6	18.6 ± 2.5	5.2 ± 0.6	1.3 ± 0.1	166 ± 34	1.5 ± 0.3	0.8 ± 0.1	9.8 ± 2.2	37 ± 6.7	193 ± 51	48.0 ± 39	44.3 ± 9

Values are means ± standard deviation, n=3 with n: number of producers

3.6. Nutritional contribution of cowpea dishes

The nutritional contributions of all the nutrients (except iron, calcium, and thiamin) were higher than the percentage of energy intake. The consumption of the nine cowpea dishes during the FFQ week allowed a mean total contribution to RNI for dietary fibre which was higher than the nutritional contribution of other nutrients. Magnesium was the second nutrient that showed an interesting contribution to RNI followed by folate. A significant contribution to RNI was also observed for protein (26%). The nutritional contribution to RNI for zinc and potassium was 18% and 17% respectively. For calcium, iron, and thiamin, the contribution was low, below 10% (Fig 3.3).

No matter the area, the stew Abobo showed an interesting nutritional contribution during the FFQ week (table 8S, supplementary data).

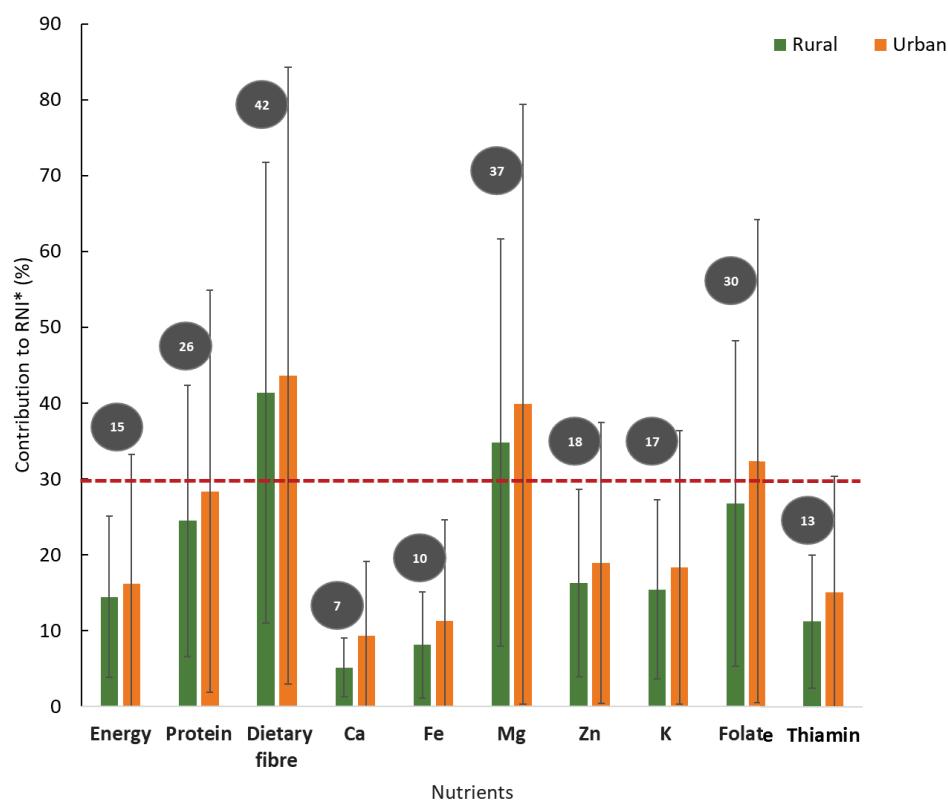


Fig 3. 3 : Sum daily contribution of the cowpea dishes to the RNI, during the FFQ week before, among cowpea consumers*.

Bars are means and errors bars are standards deviations. Values in grey circles are means between Cotonou and the rural areas.

* All respondents excluding non-consumers of cowpea seeds, i.e. 98% of respondents

Red dotted line is threshold to qualify a given food as high in protein, vitamins and minerals as defined by Codex, (1997).

The nutritional scores generated using the percentages of nutritional contribution of the cowpea dish combinations ranged between 0.5 to 21 in the studied areas (Supplementary data, "Nutritional contribution per combination of dishes consumed.xlsx", available at lorenefifame/supplementary_material_pub2). The highest scores were obtained for the few respondents who consumed between 7 to 9 different cowpea dishes within the seven previous days to the FFQ. For the most consumed combination of cowpea dishes in the rural areas (Abobo and Atassi), the score was 2.8 with nutritional contribution ranging between 4 to 34% for all the nutrients. In the urban area, the most consumed combination (Ata, Abobo, and Atassi) allowed the consumers to meet between 10 and 46% of the daily-recommended intake for all the nutrients, with a score of 3.3. Using the scores generated, two classes of cowpea consumption profiles were determined per area, based on the different cowpea dishes consumed by the respondents within the seven previous days to the FFQ. The respondents of the first class had consumed 1 to 7 different cowpea dishes in the urban area, and 1 to 8 dishes in the rural areas, whereas the respondents of the second class had consumed 3 to 9 and 6 to 9 different cowpea dishes, in urban and rural areas, respectively. However, the table 9S (supplementary data) shows that the choices of cowpea dish combinations made by the respondents of the second class allowed them to reach higher average contribution to their RNI than the choices of dishes made by the respondents of the first class (Supplementary data, Nutritional contribution per combination of dishes consumed.xlsx, available at lorenefifame/supplementary_material_pub2).

4. Discussion

In this study, we developed a FFQ to identify the consumption patterns of cowpea dishes and estimate their nutritional contribution among adults in Cotonou and rural areas in the south of Benin. Two different validation studies were performed to assess the accuracy in the estimation of the quantity of the traditional cowpea dishes consumed using both food atlas and FFQ methods as tools. The correlation and Bland-Altman tests, performed for the validation studies, are generally used to analyze the data obtained at individual and group level respectively (Cade *et al.*, 2002; Dehghan *et al.*, 2013; Amougou *et al.*, 2016). As reported by Lombard *et al.*, (2015), the correlation coefficients obtained for both types of validation studies can be qualified as an acceptable outcome for coefficients varying from 0.2 to 0.49 and a good outcome for those above 0.5. Moreover, based on the results obtained using the

Bland-Altman method for both types of validations, we can consider that the assessment of usual intake using FFQ can generate accurate data as concluded in another study (Villegas *et al.*, 2007).

In our study, the percentages of cowpea seeds consumers found in both urban and rural areas were higher than the overall percentages of legume consumption reported by other studies. In a survey (three non-consecutive 24 h food recalls) carried out among 200 urban adults aged between 25 and 60 years old in Benin, Sodjinou *et al.*, (2009) estimated the overall proportion of legumes consumers at approximately 56%.

Among cowpea dishes, the higher consumption of the stew Abobo and the mixed-dish Atassi could be related to the fact that their processing involved few steps and they can easily be cooked in the households. Many cowpea dishes are often bought as street foods and consumed out of the house particularly in the urban area, where street food consumption is more developed than in the rural areas. This latter reason could explain the differences observed between urban and rural areas for the percentages of consumption of Ata, Abobo, Vêyi, and Adowè, which were higher in the urban area than the rural areas. Concerning the frequencies of cowpea-based dishes consumption, the values of frequency of consumption (number of times of consumption during the week preceding) were in line with the results reported by Madode *et al.*, (2011). These results showed that there are not changes concerning the current frequency of consumption of cowpea compared with a decade ago.

In the dietary guideline of Benin (FAO, 2015), 2 to 3 portions of 140 g (per day) of cowpea cooked as stew are recommended to the adult population. In our study, the average usual portion size in the urban and rural areas for the stew Abobo was in the range of these recommendations.

In the present study, most of the respondents declared consuming cowpea seeds at least once a week (Tab 3.6). The total daily quantities of cowpea seeds consumed were estimated at 71 g and 58 g per day in the urban and rural areas respectively, which is in agreement with the recommendations (i.e. 50g of legumes per day) of the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems (Willett *et al.*, 2019). Taking into account these daily quantities consumed the cowpea seeds intake within a year could be estimated at 26 kg and 21 kg per adult per year in the urban and rural areas respectively. The quantity of consumption per year of cowpea obtained in our study is quite higher than those reported in others studies. The

average quantity of cowpea seeds consumed in Benin was also estimated by other authors (Gandonou *et al.*, 2019) through a food consumption survey based on the 24h-recall method performed a decade ago. They found approximately 8 kg/year/adult for cowpea seeds consumption in both the big urban cities and the rural areas. Between 1990 and 1999, Langyintuo *et al.*, (2003) reported that the quantity of consumption of cowpea was 9 kg/year/capita. These data suggest a doubling of the quantity consumed during the three last decades.

The nutritional composition of the traditional cowpea dishes, which varied depending on the producers, could reflect variations due to the cultivar and the producers' practices. In a previous study, the influence of producers' practices on the variability of the nutritional composition of cowpea-based doughnuts were also highlighted (Akissié *et al.*, 2021). Despite these observed differences in nutritional composition, the nutritional contribution obtained in our study showed that the traditional cowpea dishes are rich in dietary fibre, magnesium, and folates. They can also be considered as sources of protein, zinc, and potassium. However, the contributions to RNI for calcium and iron were very low. Indeed, in our study, the references values used to estimate the nutritional contribution for iron and zinc were those for low bioavailability due to the presence in cowpea of some mineral-chelating factors reducing bioavailability (e.g. phytate). This could explain the low percentages of contribution obtained for iron in this study. Our findings raised questions about considering cowpea dishes as potent sources of iron and calcium.

The positive points highlighted by our results is that the consumption of cowpea dishes in Benin could contribute to the nutritional security of the adult population, and may help reaching adequate protein intakes and preventing folate deficiency. The high daily contribution (above 40%) of cowpea consumption to dietary fibre requirements could play a positive role in the prevention of overweight and obesity, and some chronic diseases related to alimentation (Sievenpiper *et al.*, 2009; Jayalath *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2016).

Our study presents some strengths and limits.

Strengths

- In this study, the Food Frequency Questionnaire was validated before use for the estimation of the usual quantities and frequencies of consumption of the traditional cowpea dishes.

- The nutritional composition of cowpea dishes used for the calculations were determined by precise composition analyses on samples collected in study areas

Limitations

- Estimation of food intake using the FFQ method might lead either to underestimation or overestimation due to social desirability as observed by Steinemann et al., (2017). Several studies reported overestimation when the intakes were estimated with the FFQ method compared with food record, especially for foods known as beneficial to health, such as legumes, vegetables and fruits (Amanatidis et al., 2001; Buch-Andersen et al., 2016). Thus, in our study, it might be possible that some respondents over-reported their usual portion size consumed and/or their frequency of consumption during the FFQ. Moreover, our surveys were performed on foods based on the same raw material and this could lead to an overestimation of the total cowpea seeds consumed per day due to cumulative effect.
- The survey periods were separated by a few months between Cotonou and the rural sites, which could lead to seasonal variability. However, cowpea seeds are available year-round on the markets, and when questions were asked about this, respondents did not indicate any variation in consumption over the year.

5. Conclusion

The results showed that cowpea seeds are highly consumed with important daily quantity of consumption in all the studied areas. The nutritional composition of the dishes was determined and those results will be useful to complete food composition tables. The estimated contribution of traditional cowpea-based dishes to nutritional requirements of adults was about 15% for energy intake and above 20% for protein, dietary fibre, magnesium and folate. Regular consumption of cowpea dishes could therefore contribute to the nutritional security of the population, and help in the prevention of double burden malnutrition and high cowpea consumption should be encouraged and maintained.

3.2.2. Synthèse et perspective

Les résultats obtenus dans cette partie ont montré que les trois formes de consommation les plus fréquentes (toutes zones confondues) étaient le ragout Abobo (niébé cuit à l'eau), le plat mixte Atassi (riz et niébé cuits ensemble) et les beignets Ata (graines décortiquées et trempées) et/ou Ata-doco (graines entières ou partiellement décortiquées).

Sur la base des quantités consommées des différents plats traditionnels à base de niébé, les quantités de graines de niébé consommées par les adultes ont été estimées à 71 g/jour et 58 g/jour respectivement à Cotonou et dans les zones rurales étudiées. En ce qui concerne la composition nutritionnelle des plats étudiés, nous avons observé que les ragouts de niébé présentaient un profil nutritionnel intéressant comparativement aux beignets et plats mixtes. Les beignets de niébé présentent des teneurs en lipides très élevées (16 à 33 g/100g base humide) comparativement aux plats mixtes (0,7 à 10 g/100 BH) et aux ragouts (0,4 à 0,6 g/100 g base humide).

Selon cette étude, la contribution aux apports journaliers recommandés (AJR) était plus de 30% pour les fibres, le magnésium et les folates. Cependant, la couverture pour le fer, le calcium et la thiamine aux AJR étaient en dessous de 15%. L'étude des procédés de transformation pourrait permettre de cibler des étapes critiques entraînant des diminutions de la valeur nutritionnelle des plats.

Le procédé de fabrication du ragout Abobo a été étudié dans le cadre de la thèse de Coffigniez, (2018). Les travaux ont visé à caractériser l'évolution des teneurs en alpha-galactosides ainsi qu'en folates au cours des étapes de trempage et de cuisson des graines entières de niébé. Quant au plat mixte Atassi, il est composé d'une faible proportion de niébé (1/5 à 2/7 ; niébé/riz). Par conséquent, parmi les trois plats les plus consommés, les procédés de transformation des beignets Ata et Ata-doco ont été choisis pour la suite de l'étude. De plus, nos premières observations montrent une forte teneur en huile des beignets liée à l'absorption d'huile au cours de la friture, qui pourrait compromettre leur intérêt nutritionnel.

3.3. Impact des procédés traditionnels de fabrication des beignets sur la qualité nutritionnelle

Les beignets de niébé, Ata et Ata-doco, sont largement appréciés et consommés au Bénin. Cependant, la qualité nutritionnelle de ces plats pourrait être amoindrie par les procédés de transformation impliquant des étapes drastiques. Cette partie de l'étude a pour objectif d'identifier les étapes au cours de la fabrication des beignets Ata et Ata-doco impactant sur la composition globale, les minéraux, les folates et sur les alpha-galactosides. Des échantillons ont été collectés sur le terrain auprès de productrices locales puis analysés en laboratoire.

Les résultats sont présentés sous forme d'article dans la troisième publication de cette étude. Cette publication a pour but de déterminer l'influence des procédés de fabrication des beignets Ata et Ata-doco sur la composition globale, les minéraux et les folates. La thiamine n'a pas été prise en compte dans cette partie, car la mise au point de la méthode d'analyse n'avait pas encore été effectuée lors de la réalisation de cette phase.

3.3.1. Publication 3: Impact of traditional processing on proximate composition, folate, mineral, phytate, and alpha-galacto-oligosaccharide contents of two West African cowpea (*Vigna unguiculata L. Walp*) based doughnuts

For supplementary material, see “Annexe 6”

Statut : Article paru dans *Journal of Food composition and Analysis*

Akissoé L.^{1,2,3}, Madodé Y.E.³, Hemery Y.M.^{1,2*}, Donadjè B.V.³, Icard-Vernière C.^{1,2}, Hounhouigan D.J.^{3§}, Mouquet-Rivier C.^{1,2§}

¹ UMR Nutripass, IRD, Univ. Montpellier, Montpellier SupAgro, Montpellier France

² UMR Qualisud, Univ. Montpellier, CIRAD, IRD, Montpellier SupAgro, Univ. Avignon, Univ. Reunion Island, Montpellier, France

³ Laboratoire de Sciences des Aliments, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, Bénin

§ Authors with equivalent roles

Abstract

Doughnuts made from cowpea, a highly nutritious pulse, are frequently consumed in West Africa. As processing may affect their nutritional composition, cowpea processing into two doughnut types (ata and ata-doco) was characterized, and samples collected from 12 producers in Cotonou, Benin. Proximate composition, folate, mineral, phytate, and alpha-galacto-oligosaccharide contents were determined in the raw material, intermediate products, and doughnuts. Mass balance was assessed during ata production to monitor folate and alpha-galacto-oligosaccharides distribution, and to determine what steps most influenced their concentration. Ata was prepared with dehulled-soaked seeds, and ata-doco with whole or partially dehulled, non-soaked and dry-milled seeds. After both types of doughnuts production, lipid content increased by 11-33 times compared with raw seeds, due to oil absorption during deep-frying. Milling led to an increase of iron content by 50-57 % (ata) and 21-75 % (ata-doco production). Alpha-galacto-oligosaccharide contents decreased by 22-57 % after whipping during ata-doco, but not during ata production. The mass balance assessment showed significant reductions of folate (-50 %) and alpha-galacto-oligosaccharides (-33 %) after dehulled seed washing and soaking during ata production. This study showed that the impact of traditional processing on the nutritional value of cowpea-based doughnuts is strong, but highly variable depending on the doughnut type and producers' practices.

Keywords : Black-eye pea; Akara; Raffinose; Stachyose; Verbascose; Vitamin B9; Iron contamination; Oil absorption; Mass balance; Food analysis; Food composition; Benin

1. Introduction

Encouraging the production and consumption of pulses worldwide is important because of their numerous beneficial characteristics in terms of environmental impact and nutritional value. Indeed, pulses are an important source of plant proteins in low and middle income countries, where access to animal proteins is often limited (FAO, 2016). They also have high contents of fibre, and of some important minerals and vitamins. Cowpea (*Vigna unguiculata L. Walp*) also called black-eyed pea, black-eyed bean, or field peas (Unal *et al.*, 2006), is the most produced and consumed pulse in West Africa. It is well adapted to high temperature and drought. Thus, this crop represents a good option to face climate changes (Carvalho *et al.*, 2017) and to improve food security in low and middle income countries. In West African countries, cowpea is consumed alone, or in combination with cereals (Akinyele and Akinlosotu, 1987). As pulses have an amino acid pattern complementary to that of cereal grains, such pulse-cereal association leads to a protein mix of good nutritional quality (Jayathilake *et al.*, 2018). Cowpea seeds are also a good source of health-promoting components (Awika and Duodu, 2017), such as phenolic acids and flavonoids. Moreover, they contain soluble and insoluble fibre, and many other functional compounds, including B group vitamins, like folate (vitamin B9) and thiamine (vitamin B1) (Gonçalves *et al.*, 2016). Cowpea seeds are also a good source of minerals (potassium, phosphorus, calcium, sulphur, magnesium, iron, zinc, manganese, and copper) (Harmankaya *et al.*, 2016). However, they contain some chelating components (e.g. phytate or polyphenols) that reduce the mineral bioavailability (Rogério *et al.*, 2014). Another major constraint is the presence of alpha-galacto-oligosaccharides in the seeds and in most cowpea-based dishes. These indigestible oligosaccharides cause abdominal discomfort and flatulence (Ndubuaku *et al.*, 1989). Winham and Hutchins, (2011) reported that many people avoid consuming some pulses due to the intestinal gas they generate.

Cowpea is widely consumed in Benin, a country located in West Africa, in various dishes prepared following combinations of unit operations that can affect their nutritional value. (Madode *et al.*, 2011) identified 18 different cowpea traditional dishes in Benin among which 10 (abla, abobo, adjagbé, adowè, ata, ataclè, atassi, ata-doco, magni-magni, djongoli) are popular in the southern cities of the country. Most dishes are prepared from seeds, but cowpea leaves are sometimes used for the preparation of sauces. Among the seed-based

Résultats : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets Ata et Ata-doco

dishes, in Benin and in most other West-African countries, the cowpea-based doughnuts known as ata (with a light-brown colour crust) are widely consumed for breakfast or as a snack at any time of the day, in combination with cereal porridges, fried yam, sweet potato fries, akassa or lio (i.e. cooked fermented maize dough) (Madode *et al.*, 2011). Ata (Benin), akara (Nigeria), koose (Ghana) (Madode *et al.*, 2011) and even acarajé (Brazil) (Rogério *et al.*, 2014)) refer to the same product: a doughnut prepared by deep-frying in oil from a batter made from dehulled and soaked cowpea seeds. This dish is prepared daily at home and by street food vendors in urban and rural areas (Henshaw *et al.*, 2000). In Benin, ata-doco is another type of cowpea doughnut that differs from ata by the dark-brown colour of the crust due to partial or no dehulling. The unit operations during the preparation of these doughnuts can reduce the micronutrient contents due to fractionation, diffusion, thermal degradation during frying, or oxidation reactions. This reduction could compromise the nutritional interest of cowpea seeds, when eaten under the form of doughnuts.

Previous studies have described the production of ata and ata-doco doughnuts-or similar products-and analysed their proximate composition, mineral content and phytate content (Madode *et al.*, 2011; Rogério *et al.*, 2014; Feitosa *et al.*, 2015). However, they reported only the nutritional composition of the final products-as consumed-and did not focus on the effect of the intermediary processing steps. Moreover, to our knowledge, no study has monitored the changes in folate and alpha-galacto-oligosaccharide contents during ata and ata-doco production, although cowpea seeds are rich in this vitamin and this anti-nutritional factor (Gonçalves *et al.*, 2016).

The first objective of the present work was to characterize the traditional processing of cowpea into ata and ata-doco, as carried out in small production units in Benin and its effects on the proximate composition, micronutrient (minerals, vitamin B9) and anti-nutritional factor contents (phytate and alpha-galacto-oligosaccharide) in the raw material, intermediate and final products, depending on the used processing variants. The second objective was to identify the processing steps that are responsible for the loss of folate and alpha-galacto-oligosaccharides during ata production. Therefore, a mass balance assessment was performed in small production units to monitor the folate and alpha-galacto-oligosaccharides distribution in the different fractions generated at each step.

2. Materials and methods

2.1. Materials

2.1.1. Collection and pre-treatment of cowpea seeds

The characterization of the traditional processing of cowpea (*Vigna unguiculata L. Walp*) into ata and ata-doco was performed, using a commonly consumed local cowpea cultivar named Atchawe-Tola (white seeds), grown in Azowlissè (a rural town in Ouémé department, Benin) in 2017, and provided by a farmer under the control of the International Institute of Tropical Agriculture (IITA, Benin). The assessment of the folate and alpha-galacto-oligosaccharide losses at each unit operation of cowpea processing for ata production (mass balance assessment) was carried using the same cowpea cultivar grown in 2019 and purchased from a local farmer in the same department. Before use, cowpea seeds were cleaned by removal of damaged grains, insects and stones, placed at -20 °C for one week to destroy insect eggs, and then stored in a dry place at room temperature until processing.

2.1.2. Traditional processing into ata or ata-doco and sampling

All the producers used the same batch of raw material: cowpea seeds (1 kg) were provided to 12 cowpea-based doughnut's producers randomly selected in different areas of Cotonou (Benin) for processing into ata (n = 6) and ata-doco (n = 6), according to their own traditional procedures.

For laboratory analyses, 33 intermediates and 14 final products were sampled: cleaned and dehulled seeds, soaked grits, whipped dough and ata doughnuts (during ata production); flour, whipped dough and ata-doco doughnuts (during ata-doco production) (Fig 3.4). Duration of soaking, whipping and frying as well as frying temperatures were recorded during the preparation of both doughnuts.

The collected samples were immediately placed in an icebox for transportation to the laboratory where they were stored at -20 °C.

Résultats : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets Ata et Ata-doco

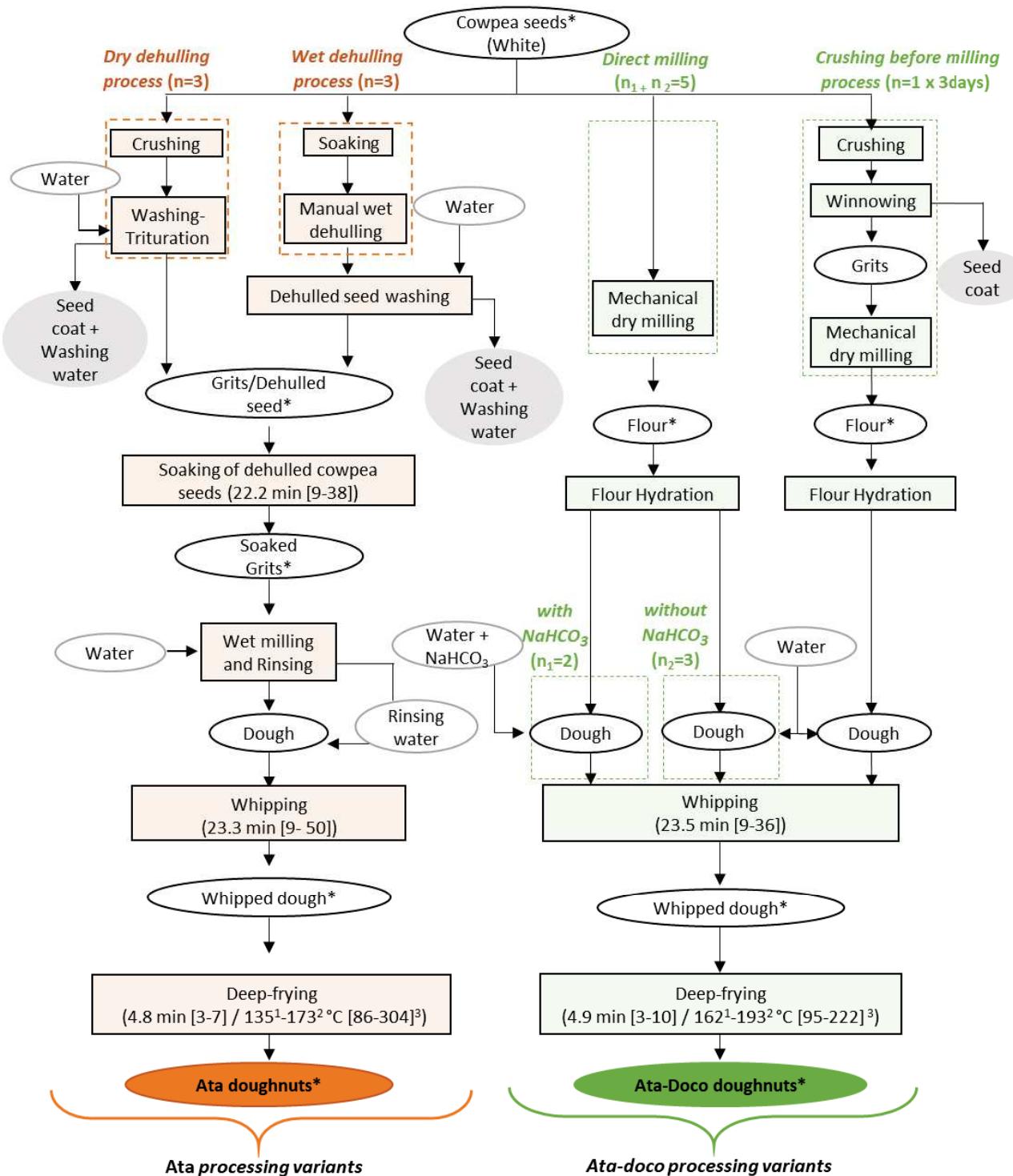


Fig 3. 4 : Diagram showing the different steps of cowpea seed processing into Ata and Ata-doco

¹: Mean initial temperature (T0); ²: Mean final temperature (TF); ³: [Min value T0 - Max value TF]; * indicates sampling points; n: number of producers; circle with grey outline: inputs; grey circle: by-products; circle with black outline: raw material and intermediate products; rectangular frame: different processing steps (light orange for Ata and light green for Ata-doco)

2.1.3. Sample preparation for composition analysis

- Freeze-drying and milling**

Fifty grams of each frozen sample were freeze-dried and milled using a laboratory mill IKA M20 (IKA Labortechnik, Staufen, Germany). All freeze-dried and milled samples were then stored at 4 °C until analysis (proximate composition, mineral, alpha-galacto-oligosaccharide and phytate contents).

- Cryo-milling**

Twenty grams of each frozen sample were milled under liquid nitrogen using a laboratory mill IKA M20 (IKA Labortechnik, Staufen, Germany) to obtain an homogeneous powder immediately placed into an opaque bag to avoid humidification through ambient air, and stored at -20 °C. Cryo-milled samples were used for folate analysis.

2.1.4. Reagents, enzymes, reference materials and standards

The test kit used for the analysis of total dietary fibre (K-TDFR kits), as well as verbascose (purity>95 %), were purchased from Megazyme (Bray Co. Wicklow, Ireland). The following chemicals were purchased from Carlo Erba (Val de Reuil, France): petroleum ether, ethanol, hydrogen peroxide, and nitric acid. Hydrochloric acid (37 %) was purchased from Fluka (Honeywell Fluka, Muskegon, USA). The following chemicals were purchased from Sigma-Aldrich (St Louis, USA): α -amylase from Aspergillus oryzae (A9857), protease from Streptomyces griseus (P5147), sodium ascorbate (A4034), galactose (G-0750), glucose (G-7528), fructose (F-2543), sucrose (S-7903), raffinose pentahydrate (206679), and Sodium hydroxide. The conjugase from chicken pancreas (P2002) was purchased from R-Biopharm (Berlin, Germany), and Folic Acid Casei Medium was purchased form Difco (Sparks, MD, USA). Reference materials were purchased from IRMM (Geel, Belgium): White cabbage (BCR-679) and Wholemeal flour (BCR-121).

2.2. Methods

2.2.1. Composition analysis

- Proximate composition and energy determination**

Résultats : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets Ata et Ata-doco

Total dry matter (DM), crude protein, lipid and ash contents were determined using standard methods (AOAC, 1995). Soluble and insoluble dietary fibre contents were determined with the Megazyme K-TDFR kit, as described by Njoumi et al., (2019). Before analysis, all frozen doughnuts were lyophilized and cut into small pieces. Each sample was reduced into powder in petroleum ether using an ultra-turrax IKA T10 (IKA Labortechnik, Staufen, Germany), then filtered, and dried overnight at ambient temperature to obtain a defatted powder. Powdered samples of ata and ata-doco doughnuts were pooled based on the processing variant used by the producers (Fig 3.4), yielding 5 pooled samples: 2 for ata processing and 3 for ata doco processing. After that, samples were successively digested with α -amylase, protease and amyloglucosidase, and then filtered. After filtration, extracts were precipitated with 95 % ethanol warmed at 70 °C (extract/ethanol; 1/4; v/v) for soluble fibre determination, and the filtration residue was used for insoluble dietary fibre quantification. Available carbohydrates (AC) were calculated by difference: AC (DM) = (100 g – (protein content + lipid content + total dietary fibre + ash content)). Energy was determined using the Atwater coefficients: 4 kcal.g⁻¹ for proteins and available carbohydrates, 9 kcal.g⁻¹ for lipids, and 2 kcal.g⁻¹ for dietary fibres (FAO, 2003).

• Minerals

Total iron, zinc, calcium, and magnesium were determined in cowpea seeds, intermediate products and doughnuts, as described by Njoumi et al., (2018). Briefly, after wet mineralization of the freeze-dried samples with a mixture of hydrogen peroxide/nitric acid (1/7; v/v), using an Ethos 1 microwave digestion system (Milestone, Sorisole, Italy), minerals were determined by optical emission spectrometry using an inductively coupled plasma - optical emission spectrometer ICP-OES 5100 apparatus (Agilent Technologies, Les Ulis, France). White cabbage (BCR-679) was used as reference material, with certified mineral contents of 5.5 ± 0.3 mg iron .100 g⁻¹ DM, 8.0 ± 0.3 mg zinc .100 g⁻¹ DM, 777 ± 65 mg calcium .100 g⁻¹ DM, and 136 ± 13 mg magnesium .100 g⁻¹ DM. The average mineral contents obtained during this study were 5.7 ± 0.4 mg iron .100 g⁻¹ DM, 7.0 ± 2.7 mg zinc .100 g⁻¹ DM, 798 ± 49 mg calcium .100 g⁻¹ DM, and 128 ± 24 mg magnesium .100 g⁻¹ DM (on n = 10 analyses).

- **Folate (B9 vitamin) quantification**

Total folate was determined by enzymatic extraction and microbiological assay, using the method described by Kariluoto and Piironen, (2009) and adapted by Bationo et al., (2020). Briefly, 0.5 g of each sample was digested with α -amylase (20 mg.mL^{-1} in 1% sodium ascorbate) and conjugase (100 mg.mL^{-1} in ultrapure water) at 37°C for 3 h. After this first enzymatic treatment, protease (3 mg.mL^{-1} in 1% sodium ascorbate) was added and the mixture was incubated at 37°C for 1 h. Sample extracts were diluted and pipetted into a 96-well microtiter plate (Greiner Bio-One, Frickenhausen, Germany). Folic Acid Casei Medium inoculated with *Lactobacillus rhamnosus* ATCC 7469 was added to all wells and incubated at 37°C for 18 h. Wholemeal flour (BCR-121) was used as reference material to check the accuracy of the total folate quantification method using the same analytical procedure. After incubation, folate was quantified using a microplate reader (Tecan, Infinite M200 PRO, Lyon, France) set at 590 nm to measure the turbidity due to bacterial growth.

The certified total folate content for the reference material BCR-121 (whole wheat flour) was $50 \pm 7 \text{ } \mu\text{g.100 g}^{-1}$ DM. The average total folate content obtained during this study was $47 \pm 6 \text{ } \mu\text{g.100 g}^{-1}$ DM (average value for $n = 49$ analyses).

- **Phytic acid**

Phytic acid (IP6) content was determined by high-performance anion-exchange chromatography (Dionex, Sunnyvale, CA, USA) after sample extraction in 0.5 M HCl (0.1/5 ; w/v) at 100°C for 6 min, according to the method described by Lestienne et al., (2005).

- **Alpha-galacto-oligosaccharides**

Alpha-galacto-oligosaccharides (raffinose, stachyose and verbascose) and their potential degradation products (saccharose, galactose, fructose, glucose) were extracted as described by Njoumi et al., (2019) with some modifications. For samples used to assess the effect of processing variants, 3 mL of ethanol (78 %; v/v) was added to 80 mg of each lyophilized sample for extraction in two rounds at 80°C for 20 min. Supernatants were dehydrated in a vacuum centrifuge concentrator RC 10 (Thermo Fisher Scientific, Asheville, NC, USA), and the dry extracts were dissolved in 2 mL of pure water, before injection.

Résultats : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets Ata et Ata-doco

The samples collected for the mass balance assessment were not lyophilized, and 80–700 mg were used, depending on the dry matter content of each sample (higher quantity was required for samples with low dry matter content). Alpha-galacto-oligosaccharides extraction followed the same procedure, but samples of soaking water were injected directly after filtration through cellulose acetate filters (0.2 µm).

Alpha-galacto-oligosaccharides separation and quantification were carried out by high performance anion exchange chromatography with pulsed amperometric detection using a Thermo Scientific™ Dionex™ ICS-6000 HPIC™ System (Thermo Fisher Scientific, Sunnyvale, CA, USA) equipped with a Dionex™ CarboPac™ PA210-Fast-4 µm analytical column (150 × 4 mm) and a Dionex™ CarboPac™ PA210-Fast-4 µm guard column (30 × 4 mm). Elution was performed at 30 °C with isocratic flux at 0.8 mL·min⁻¹ of 12 mmol·L⁻¹ KOH. Injection volume ranged from 10 to 25 µL. Sugars were identified by comparison of the retention time with that of appropriate standards (galactose, glucose, fructose, sucrose, raffinose pentahydrate, verbascose).

- **Micronutrient quantification in defatted doughnuts**

To assess the “passive dilution effect” due to oil uptake during frying, the micronutrient content of “defatted samples” was calculated on a dry matter basis with the following equation:

$$C_{df} = \frac{C_0}{100 - F_s} * 100$$

Where C_{df} is the micronutrient content in the defatted sample, C_0 the micronutrient concentration in the sample diluted with oil and F_s the fat content (% DM) of the sample. This formula allows assessing the part of decrease caused by other phenomena than oil uptake, such as enzymatic degradation, diffusion, oxidation or thermal inactivation.

2.2.2. Mass balance assessment

To identify the unit operations that have the greatest effect on folate and alpha-galacto-oligosaccharide contents, a mass balance assessment was carried during ata production in small processing units. Ata doughnuts were produced by three producers using the dry

Résultats : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets Ata et Ata-doco

dehulling processing in Cotonou (Benin). Batches of 2 kg of cowpea seeds were provided to each producer. The weight of all containers used for collecting the fractions obtained at each step was recorded, as well as the weight of the produced fractions (raw material, intermediate products, by-products, and doughnuts). The samples collected from the different fractions were also weighed. These weights were taken into account in the calculation to determine the exact mass at each processing step. The DM contents of all samples were measured, and combined with the folate and sugar contents to calculate the amounts of folate (in µg) and alpha-galacto-oligosaccharide (in mg) in the raw material, intermediate products, and final products. Then, the folate and alpha-galacto-oligosaccharide distribution in the produced fractions was expressed as the percentage of their initial quantity in the raw material.

2.3. Statistical analysis

Data were analysed with the Statgraphics Centurion 16.2 software (FranceStat, Neuilly, France). To describe the nutritional composition of intermediate and final products, means and standard deviations were calculated, and differences between samples were assessed by one-way analysis of variance (ANOVA) followed by the Newman-Keuls test, with a significance level set at $p < 0.05$.

To assess the effect of the different processing factors on the nutrient contents of ata and ata-doco doughnuts, two-level (ata) and three-level (ata-doco) nested ANOVAs were carried out. For example, the linear model for a two-way unbalanced nested arrangement, with two nested factors (A: fixed factor with i levels, and B: random factor with j levels) was:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_{j(i)} + \varepsilon_{k(ij)}$$

where: Y_{ijk} is the k^{th} observation within the j^{th} level of factor B within the i^{th} level of factor A; μ is the overall mean; α_i is the fixed effect due to the i^{th} level of factor A; $\beta_{j(i)}$ is the random effect due to the j^{th} level of factor B nested within the i^{th} level of A; and $\varepsilon_{k(ij)}$ is the residual error of the observation Y_{ijk} .

For ata doughnuts, “dehulling type” was used as fixed factor (two levels: dry dehulling and wet dehulling) and nested within the factor “producer” (six levels: 1–6). For ata-doco, the first factor was “milling type” (two levels: direct milling and crushing before milling) nested within

Résultats : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets Ata et Ata-doco

the factor “use of NaHCO₃” (two levels: with and without NaHCO₃) that in turn, was nested within the factor “producer” (six levels: 1–6). The variance associated with each factor was calculated and expressed as a percentage.

General linear models were used to evaluate the association between processing parameters and doughnut nutrient content (proximate composition, mineral, folate, phytate and alpha-galacto-oligosaccharide):

$$y = \beta_0 + \beta_1 * (\text{factor 1}) + \beta_2 * (\text{factor 2}) + \dots + \beta_k * (\text{factor } k)$$

Where β_0 is the constant, and β_{1-k} the coefficients associated with each factor.

The factors considered were the processing parameters: number of washing of the grits after dehulling, soaking duration, soaking water volume/seed volume ratio, number of milling cycles, whipping duration, and frying time and temperatures (ata); type of milling, whipping duration, quantity of NaHCO₃ added to the dough, and frying time and temperatures (ata-doco). For both doughnut types, the effect of frying parameters on the mineral contents was not assessed. Models were adjusted, by removing the not significant factors (based on a statistical significance level set at p < 0.05).

3. Results and discussion

3.1. Characterization of Ata and Ata-doco processing

During the traditional ata processing (all variants), the main steps were dehulling, soaking, wet milling, whipping, and frying (Fig 3.4). Ata doughnuts were prepared from dehulled seeds obtained by dry or wet dehulling. Wet dehulling was performed manually using seeds previously wetted with tap water for softening the seed coat. For dry dehulling, cowpea seeds were coarsely milled into grits using local mills equipped with two metallic grindstones. The crushing step was followed by washing and manual rubbing to remove the seed coats. Grits obtained after dehulling was soaked and milled into a dough using the same type of mills previously used for crushing. During ata production, the mean duration of cowpea grits soaking, dough whipping and frying were 22 ± 11 min, 23 ± 15 min, and 5 ± 2 min respectively, for 1 kg of cowpea processed. The mean frying temperature varied between 135 °C at the beginning (mean T₀) and 173 °C at the end of cooking (mean T_F). For ata-doco production, the

main steps were dry milling, whipping and frying. Whole seeds were directly milled (direct milling variant) or crushed grossly and then winnowed before milling into flour (crushing before milling variant) (Fig 3.4). Then, water was added to the flour to obtain a dough. Among the five producers of ata-doco doughnuts who used the direct milling variant, two added NaHCO_3 to the dough as leavening agent during whipping. Whatever the variant, the mean whipping and frying times were 23 ± 9 min and 5 ± 2 min respectively, with frying temperatures ranging between 162 (mean T_0) and 193 °C (mean T_F). The variability observed for the frying temperature for both doughnuts could be due to the different energy sources used by the producers (firewood, charcoal and wood shavings).

3.2. Effect of traditional processing variants on Ata and Ata-doco nutritional composition

3.2.1. Proximate composition of ata and ata-doco doughnuts

The proximate composition of cowpea seeds, ata and ata-doco is presented in table 3.9. The mean protein content of the raw material was $22 \text{ g.}100 \text{ g}^{-1} \text{ DM}$, which is in the range reported by Madode et al., (2012) (*i.e.* $22\text{--}30 \text{ g.}100 \text{ g}^{-1} \text{ DM}$) for thirty cowpea varieties grown in West Africa. Protein content in cowpea seeds can vary depending on the cultivar (Jayathilake *et al.*, 2018), environmental conditions and agronomic practices (Sebetha *et al.*, 2014; Dakora and Belane, 2019). The lipid content of the cowpea seeds in our study was $1.6 \text{ g.}100 \text{ g}^{-1} \text{ DM}$, which is rather low, as usually observed in pulses (Dilis and Trichopoulou, 2009). The total dietary fibre content of cowpea seeds was high ($15 \text{ g.}100 \text{ g}^{-1} \text{ DM}$) and on average 83 % of fibres were insoluble. Other studies reported similar results for dietary fibre content in cowpea seeds (Sreerama *et al.*, 2012; Eashwarage *et al.*, 2017).

Résultats : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets Ata et Ata-doco

Tab 3. 9 : Proximate composition of the cowpea seeds and doughnuts (ata and ata-doco) according to different processes.

Products	Process	Dry matter	Protein	Fat	Available carbohydrate**	Ash	Dietary fibres		Energy	
		(g/100g)	(g/100g DM)	(g/100g DM)	(g/100g DM)	(g/100g DM)	IDF	SDF	(Kcal/100g)	
Cowpea seeds		89 ± 0.3	22.0 ± 1.0	1.6 ± 0.0	58 ± 1.1	3.3 ± 0.0	12.4 ± 1.0	2.5 ± 0.4	14.9 ± 1.2	309 ± 1
Ata	Wet dehulling (n=3)	58 ± 1.0 ^a	14.0 ± 1.4 ^a	42.7 ± 2.0 ^b	31 ± 3.4 ^{ab}	2.6 ± 0.9 ^a	8.4 ± 0.4 ^b	1.2 ± 0.3 ^a	9.6 ± 0.4 ^b	337 ± 12 ^b
	Mechanical dry dehulling (n=3)	61 ± 9.7 ^a	14.2 ± 3.2 ^a	52.9 ± 13 ^c	24 ± 16 ^a	2.9 ± 0.2 ^a	5.2 ± 0.6 ^a	1.3 ± 0.4 ^a	6.5 ± 0.3 ^a	388 ± 36 ^c
Ata-doco	Direct milling (+) NaHCO ₃ (n=2)	54 ± 3.6 ^a	17.1 ± 1.2 ^b	32.4 ± 2.4 ^a	36 ± 3.1 ^b	3.4 ± 0.3 ^a	8.6 ± 1.1 ^b	2.2 ± 0.3 ^b	10.8 ± 1.5 ^b	285 ± 17 ^a
	Direct milling (-) NaHCO ₃ (n=3)	53 ± 3.5 ^a	17.9 ± 1.0 ^b	25.6 ± 5.5 ^a	40 ± 6.6 ^b	5.4 ± 1.4 ^b	9.0 ± 0.9 ^b	2.3 ± 0.4 ^b	11.3 ± 0.8 ^b	254 ± 8 ^a
	Crushing before milling (n=1) *	58 ± 4.4 ^a	15.8 ± 0.8 ^{ab}	27.1 ± 2.5 ^a	41 ± 2.2 ^b	6.0 ± 1.0 ^b	8.3 ± 0.6 ^b	1.7 ± 0.6 ^{ab}	10.0 ± 1.2 ^b	283 ± 30 ^a
Ata vs.	P-value	Ns	0.0005	<0.00001	0.002	<0.00001	0.02	0.0013	0.0028	<0.00001
Ata-doco	Ata	59 ± 6.8	14.1 ± 2.4	47.8 ± 10	27 ± 12	2.8 ± 0.6	7.1 ± 1.8	1.2 ± 0.3	8.3 ± 1.7	362 ± 37
	Ata-doco	56 ± 4.3	16.9 ± 1.3	27.8 ± 4.6	39 ± 4.7	5.1 ± 1.5	8.6 ± 0.8	2.1 ± 0.5	10.7 ± 1.2	273 ± 18

n: number of producers.

IDF: Insoluble dietary fibres; SDF: soluble dietary fibres; TDF: Total dietary fibres.

Results are the mean ± standard deviations (samples were collected from the indicated number of producers and analysed in duplicate). *: Samples were collected from this producer on three different days. **: Values were obtained by calculation.

Values in a same column with different superscript letters are significantly different (p < 0.05, Newman–Keuls test was used for post-hoc comparison).

Résultats : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets Ata et Ata-doco

The protein, ash, and total (soluble and insoluble) dietary fibre contents were significantly lower in ata than ata-doco doughnuts ($p < 0.05$). As expected, lipid content increased sharply during the doughnut preparation. The mean lipid content of ata doughnuts was significantly higher than that of ata-doco (48 and 28 g.100 g⁻¹ DM for ata and ata-doco, respectively). McWatters, (1983) obtained similar results for doughnuts prepared from dehulled-soaked cowpea and whole cowpea flour (that presented lipid contents of 32 g.100 g⁻¹ DM and 21 g.100 g⁻¹ DM, respectively). The higher oil absorption by doughnuts prepared with dehulled and soaked seeds compared with those prepared with whole flour could be due to the dough particle size that is influenced by the milling conditions. Indeed, wet milling generates finer particles than dry milling, and products with a predominantly fine particle size distribution have a very high oil absorption capacity (Moreira *et al.*, 1997; Singh *et al.*, 2004). Another possible cause of the difference of oil absorption could be the higher soluble fibre content of the dough used for ata-doco preparation. By swelling in the presence of water, soluble fibre can increase the dough viscosity and this could influence oil absorption. Indeed, Lee and Inglett, (2007) showed that the incorporation of oat β-glucans into a wheat flour batter reduces oil absorption during deep-frying, because of the high water retention capacity and viscosity generated by these polysaccharides. Moreover, a study on poori, a traditional wheat-based doughnut consumed in India, showed that the use of fibre-rich flour (4.2 % total dietary fibres, 1.3 % soluble dietary fibres) allowed reducing the oil content by 20 % compared with the control sample (Yadav and Rajan, 2012). In this study, the major consequences of oil absorption during frying were the passive reduction of the proportions of other nutrients in both doughnut types and the strong increase of the energy value (Table1). Thus, the energy value of ata doughnuts was significantly higher than that of ata-doco ($p < 0.05$), due to the high lipid content of ata doughnuts, which was twice higher than the one of ata-doco doughnuts.

The producers' practices influenced the proximate composition of the doughnuts. The two-level nested ANOVA showed that 85–97 % of the variability observed in ata doughnut proximate composition (dry matter, protein, lipid and ash contents) was due to inter-producer variability (Table 1S, supplementary data). A specific analysis of the processing parameters that can lead to this producer-related variability highlighted a negative effect of dry dehulling, soaking duration, and initial frying temperature (T_0) on protein content ($p < 0.05$, Table 2S, supplementary data). Ash content was negatively correlated with soaking duration and

positively correlated with the number of milling cycles ($p < 0.05$, Table 2S, supplementary data).

For ata-doco doughnuts, 55 % and 60 % of the observed variability of protein and lipid contents was explained by inter-producer variability, respectively (Table 3S, supplementary data). Protein content variability was related also to the “milling type” factor (27 %), with higher mean protein content in doughnuts prepared using the “direct milling” than the “crushing before milling” variant ($17 \text{ g.}100 \text{ g}^{-1} \text{ DM}$ vs $16 \text{ g.}100 \text{ g}^{-1} \text{ DM}$, $p < 0.05$). Moreover, by studying the effect of processing parameters on protein content, a negative correlation was observed with the variant “crushing before milling” and the initial frying temperature ($p < 0.05$, Table 2S, supplementary data). The analysis of the impact of the processing parameters showed that frying duration and initial frying temperature (T_0) were positively correlated with the lipid content. The nested ANOVA showed that the ash content of ata-doco doughnuts was mainly influenced by the factors “use of NaHCO_3 ” and “producer” (that contributed to 44 % and 37 % of the variance, respectively).

3.2.2. Changes in micronutrients and anti-nutritional factors during Ata and Ata-doco production

- Minerals**

Cowpea seeds contained appreciable amounts of minerals with nutritional interest, particularly iron and magnesium (Tab 3.10). Iron content of doughnuts increased during processing for both types. This increase in iron content of both doughnut types could be due to contamination from various possible sources throughout processing. Some authors reported that exogenous iron from pots and mills can be added to the food during processing (Adish *et al.*, 1999; Hama-Ba *et al.*, 2019). Greffeuil et al., (2011) observed this contamination after maize milling into flour. The processing steps before frying did not lead to a significant reduction of zinc, calcium and magnesium content in both doughnut types. However, a passive decrease in mineral contents was observed after frying due to oil absorption by the dough. Indeed, the calculation of the mineral content in defatted ata doughnuts showed zinc, calcium, and magnesium contents ($5.2 \text{ mg.}100 \text{ g}^{-1}$, $83 \text{ mg.}100 \text{ g}^{-1}$ and $188 \text{ mg.}100 \text{ g}^{-1} \text{ DM}$, respectively), similar to that in the whipped dough. The mean iron, zinc, calcium and magnesium contents calculated in defatted ata-doco were $4.1 \text{ mg.}100 \text{ g}^{-1}$, 90

Résultats : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets Ata et Ata-doco

mg.100 g⁻¹ and 168 mg.100 g⁻¹ DM, respectively. These results show the oil dilution effect on mineral contents.

For ata doughnuts, the nested ANOVA (Table 1S, supplementary data) showed that more than 60 % of the variability of iron, calcium, and magnesium content was due to the inter-producer variability. Conversely, the variability of zinc content was very low and not related to any factor. The analysis of the different processing parameters that could cause this producer-related variability of iron, calcium, and magnesium contents in ata doughnuts showed a negative effect of the number of dehulled-seed washing steps on iron content ($p < 0.05$, Table 2S, supplementary data), and a negative effect of the number of dehulled-seed washing steps and of soaking duration on magnesium and calcium content ($p < 0.05$, Table 2S, supplementary data). These decrease in iron, calcium and magnesium contents of ata doughnuts could be due to leaching from the grits during washing.

For ata-doco, the iron content variability was related to the factor "milling type" (84 % of variance, Table 3S, supplementary data), with higher iron content in the "crushing before milling" than in the "direct milling" variant (28 ± 10 mg.100 g⁻¹ DM vs. 5.5 ± 1 mg.100 g⁻¹), which shows the influence of processing types on iron contamination. Zinc content variability was also low and more related to the factor "producer" (50 %). This producer-related variability was not caused by the processing parameters. The calcium and magnesium content variability was mainly due to the factor "use of NaHCO₃" (52 % of the variance for calcium, and 56 % for magnesium). Indeed, the calcium and magnesium contents of ata-doco doughnuts prepared with NaHCO₃ were lower than those of doughnuts prepared without NaHCO₃ (58 ± 1 mg.100 g⁻¹ DM vs. 68 ± 6 mg.100 g⁻¹ DM for calcium and 113 ± 3 mg.100 g⁻¹ DM vs. 124 ± 7 mg.100 g⁻¹ DM for magnesium).

Résultats : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets Ata et Ata-doco

Tab 3. 10 : Changes in mineral, phytate and folate contents (on a dry matter basis) during ata and ata-doco processing.

Dish	Processing	Products	Iron (mg/100g DM)	Zinc (mg/100g DM)	Calcium (mg/100g DM)	Magnesium (mg/100g DM)	Phytate (mg/100g DM)	Folate (µg/100g DM)
Ata	Wet dehulling (n=3)	Raw cowpea seeds	5.8 ± 0.0 ^a	3.9 ± 0.0 ^c	78 ± 1 ^d	163 ± 1 ^c	979 ± 81 ^{cd}	362 ± 33 ^e
		Dehulled seeds	4.5 ± 0.1 ^a	3.9 ± 0.1 ^c	61 ± 12 ^c	144 ± 2 ^b	1049 ± 82 ^d	318 ± 43 ^d
		Soaked grits	4.5 ± 0.2 ^a	4.0 ± 0.1 ^c	65 ± 9 ^c	143 ± 2 ^b	1044 ± 72 ^d	261 ± 23 ^c
		Whipped dough	11.5 ± 6.8 ^{bc}	3.6 ± 0.3 ^c	86 ± 23 ^d	135 ± 8 ^b	871 ± 99 ^b	195 ± 21 ^b
		Ata	8.9 ± 3.0 ^{ab}	2.3 ± 0.4 ^a	44 ± 9 ^{ab}	91 ± 17 ^a	562 ± 101 ^a	98 ± 29 ^a
Ata-doco	Mechanical dehulling (n=3)	Dehulled seeds	4.6 ± 0.2 ^a	3.5 ± 0.3 ^c	53 ± 3 ^{bc}	140 ± 5 ^b	988 ± 69 ^{cd}	305 ± 22 ^d
		Soaked grits	4.7 ± 0.4 ^a	3.9 ± 0.1 ^c	55 ± 5 ^{bc}	139 ± 6 ^b	982 ± 38 ^{cd}	293 ± 38 ^d
		Whipped dough	13.4 ± 6.7 ^c	4.0 ± 0.1 ^c	60 ± 2 ^c	137 ± 7 ^b	919 ± 63 ^{bc}	204 ± 30 ^b
		Ata	7.1 ± 2.5 ^a	2.7 ± 0.5 ^b	37 ± 11 ^a	92 ± 22 ^a	519 ± 105 ^a	113 ± 27 ^a
		Raw cowpea seeds	5.8 ± 0.0 ^A	3.9 ± 0.0 ^{BC}	78 ± 1 ^{DE}	163 ± 1 ^F	979 ± 81 ^E	362 ± 33 ^F
Ata-doco	Direct milling with NaHCO ₃ (n=2)	Flour	7.5 ± 1.4 ^A	3.9 ± 0.2 ^{BC}	77 ± 3 ^{DE}	153 ± 5 ^{DE}	940 ± 76 ^E	273 ± 41 ^D
		Whipped dough	8.4 ± 2.3 ^A	4.2 ± 0.0 ^C	86 ± 0 ^F	153 ± 7 ^{DE}	814 ± 14 ^C	180 ± 44 ^{AB}
		Ata-doco	5.5 ± 0.6 ^A	3.0 ± 0.0 ^A	58 ± 1 ^A	113 ± 2 ^A	601 ± 79 ^A	207 ± 46 ^{BC}
		Flour	7.2 ± 0.3 ^A	4.1 ± 0.1 ^{BC}	78 ± 5 ^{DE}	160 ± 4 ^{EF}	929 ± 85 ^E	302 ± 41 ^{DE}
		Whipped dough	7.6 ± 1.0 ^A	3.9 ± 0.2 ^{BC}	86 ± 5 ^F	156 ± 5 ^{DE}	800 ± 42 ^C	306 ± 38 ^E
Crushing + Milling (n=1)*	Ata-doco	Ata-doco	5.5 ± 0.9 ^A	3.0 ± 0.2 ^A	69 ± 7 ^{BC}	127 ± 8 ^C	641 ± 79 ^{AB}	176 ± 36 ^{AB}
		Flour	37.9 ± 10 ^C	3.9 ± 0.0 ^{BC}	75 ± 8 ^{CD}	153 ± 3 ^{DE}	980 ± 47 ^E	287 ± 36 ^{DE}
		Whipped dough	37.9 ± 13 ^C	3.8 ± 0.2 ^B	84 ± 6 ^{EF}	149 ± 5 ^D	876 ± 41 ^D	232 ± 26 ^C
		Ata-doco	28.3 ± 12 ^B	2.9 ± 0.2 ^A	66 ± 6 ^B	121 ± 5 ^B	686 ± 45 ^B	157 ± 10 ^A

n: number of producers. In each sub-column, values with different superscript letters are significantly different (p < 0.05, Newman-Keuls test was used for post-hoc comparison).

Results are the mean ± standard deviation (samples were collected from the indicated number of producers). *: Samples were collected from this producer on three different days.

- **Folate**

The total folate content of the initial raw material was $362 \pm 33 \mu\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ DM (Tab 3.10). Hoppner and Lampi, (1993) found a similar folate content of $367 \pm 28 \mu\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ DM in cowpea seeds purchased from a local market in Canada. During the production of both doughnut types, a reduction in folate content was observed after each step. The mean total folate content of ata-doco doughnuts was significantly higher than that of ata doughnuts ($177 \pm 36 \mu\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ DM vs. $111 \pm 29 \mu\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ DM). This difference in the mean folate content of ata and ata-doco doughnuts could be due to the absence of soaking during ata-doco production. Indeed, a negative effect of soaking duration on folate content was observed during ata production (Table 2S, supplementary data for details). Different studies showed the effect of the soaking on folate content in legumes. Arcot et al., (2002) observed a reduction of 31 % of total folate after soaking of soybeans overnight at room temperature. In their study, the recovery of folate from soaked soybeans and the soaking water was almost equal to 100 % of the initial amount in the soybeans showing that the loss was due to leaching into the soaking water. During soaking at 30 °C of whole cowpea seeds, Coffigniez et al., (2019b) also observed folate diffusion, but at a much lower rate than at 60 °C and 95 °C. In our study, the negative effect of soaking duration observed could be due to an increased diffusion due to the high surface area generated by the small size of the grits.

The nested ANOVA showed that the total folate content variability for ata was mainly related to the factor "producer" (91 % of variance, Table 1S, supplementary data). Indeed, the total folate content was negatively correlated with the dry dehulling variant, the number of dehulled seed washing steps, and the soaking duration ($p < 0.05$, Table 2S, supplementary data). For ata-doco, 87 % of the observed variability was due to inter-producer variability (Table 3S, supplementary data), possibly due to the NaHCO_3 amount added to the dough (positive correlation, $p < 0.05$, Table 2S supplementary data).

- **Phytate**

Phytate content of both doughnut types was only slightly affected by processing (Tab 3.10), although it decreased at some production steps. During ata production, dehulling did not have any effect on phytate contents. This could be due to phytic acid localization in the seed. In pulses, phytic acid is stored in globoids, located in protein bodies that are in the seed cotyledons (Reddy, 2002). Thus, the dehulling is not an efficient way to reduce phytate in cowpea seeds. Similarly, soaking did not significantly reduce the phytate content of dehulled seeds. Lestienne et al., (2005) found that soaking at 30 °C for 24 h significantly reduced phytate content in millet, maize, rice and soybean, but not in cowpea. Ologhobo and Fetuga, (1984) observed a reduction of 20–28 % in phytate contents in three cowpea cultivars after soaking at 27 °C for 3 days. Thus, the lack of effect observed in our study may be due to the short soaking duration (between 9 and 38 min). In our study, phytate content in the dough used for ata preparation decreased by 11 % and 6% during the whipping step compared with soaked seeds, for the wet and dry dehulling variants, respectively. This small effect of whipping on phytate content was also observed during ata-doco preparation. The use of NaHCO₃ during ata-doco processing did not affect phytate contents. The mean final phytate content was significantly higher in ata-doco than in ata doughnuts (656 mg.100 g⁻¹ DM for ata-doco vs. 526 mg.100 g⁻¹ DM for ata). The variability in the doughnut phytate content was mostly related to the factor "producer" (63 % and 75 % of the variance for ata and ata-doco, respectively). For ata, this producer-related variability might be due to the number of grits washing steps and the duration of soaking that were negatively correlated with phytate content ($p < 0.05$, Table 2S, supplementary data). For ata-doco, the inter-producer variability was not explained by the processing parameters.

- **Alpha-galacto-oligosaccharides**

The total alpha-galacto-oligosaccharide content in cowpea seeds reached 4417 mg.100 g⁻¹ DM, and stachyose content was 8–10 times higher than that of verbascose and raffinose, as already reported for other legume seeds (Njoumi et al., 2019). The changes in alpha-galacto-oligosaccharide contents during ata and ata-doco processing are shown in figure 3.5. During ata production, raffinose (27 %) and verbascose (28 %) content increased after wet dehulling. Sreerama et al., (2010) studied alpha-galacto-oligosaccharides distribution in

Résultats : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets Ata et Ata-doco

cotyledon, embryonic axis and seed coat of two pulse species: chickpea (*Cicer arietinum L.*) and horse gram (*Macrotyloma uniflorum L. Verdc.*). They found higher concentrations of these oligosaccharides in the cotyledon, but stachyose was present in higher amounts also in the embryonic axis. This could explain the increase observed after wet dehulling because the removal of the seed coat, which does not contain raffinose and verbascose, could lead to a passive increase of these compounds in dehulled seeds. After dehulling during ata preparation, a decrease of 15–20 % in the content of the three alpha-galacto-oligosaccharide forms was observed up to the “whipped dough” step, whatever the variant. The reduction after whipping was more significant (total alpha-galacto-oligosaccharide content was halved) during ata-doco processing. This reduction most probably results from the alpha-galactosidase activity in cowpea seeds (Coffigniez *et al.*, 2018b) or provided by exogenous factors, such as *Aspergillus niger* (Somiari and Balogh, 1992). Bulgarelli *et al.*, (1988) reported that *A. niger* is among the predominant microbiological populations in the dough used for akara (i.e. ata) preparation. After frying, the difference in alpha-galacto-oligosaccharide content of both doughnuts was compensated by the higher oil absorption in ata, and the mean total alpha-galacto-oligosaccharide contents of ata and ata-doco doughnuts were $2695 \pm 792 \text{ mg.}100 \text{ g}^{-1} \text{ DM}$ and $2680 \pm 255 \text{ mg.}100 \text{ g}^{-1} \text{ DM}$, respectively. When calculated in defatted doughnuts, the total alpha-galacto-oligosaccharide content was significantly higher in defatted ata than in ata-doco ($4623 \text{ mg.}100 \text{ g}^{-1} \text{ DM}$ vs. $3713 \text{ mg.}100 \text{ g}^{-1} \text{ DM}$, respectively).

Résultats : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets Ata et Ata-doco

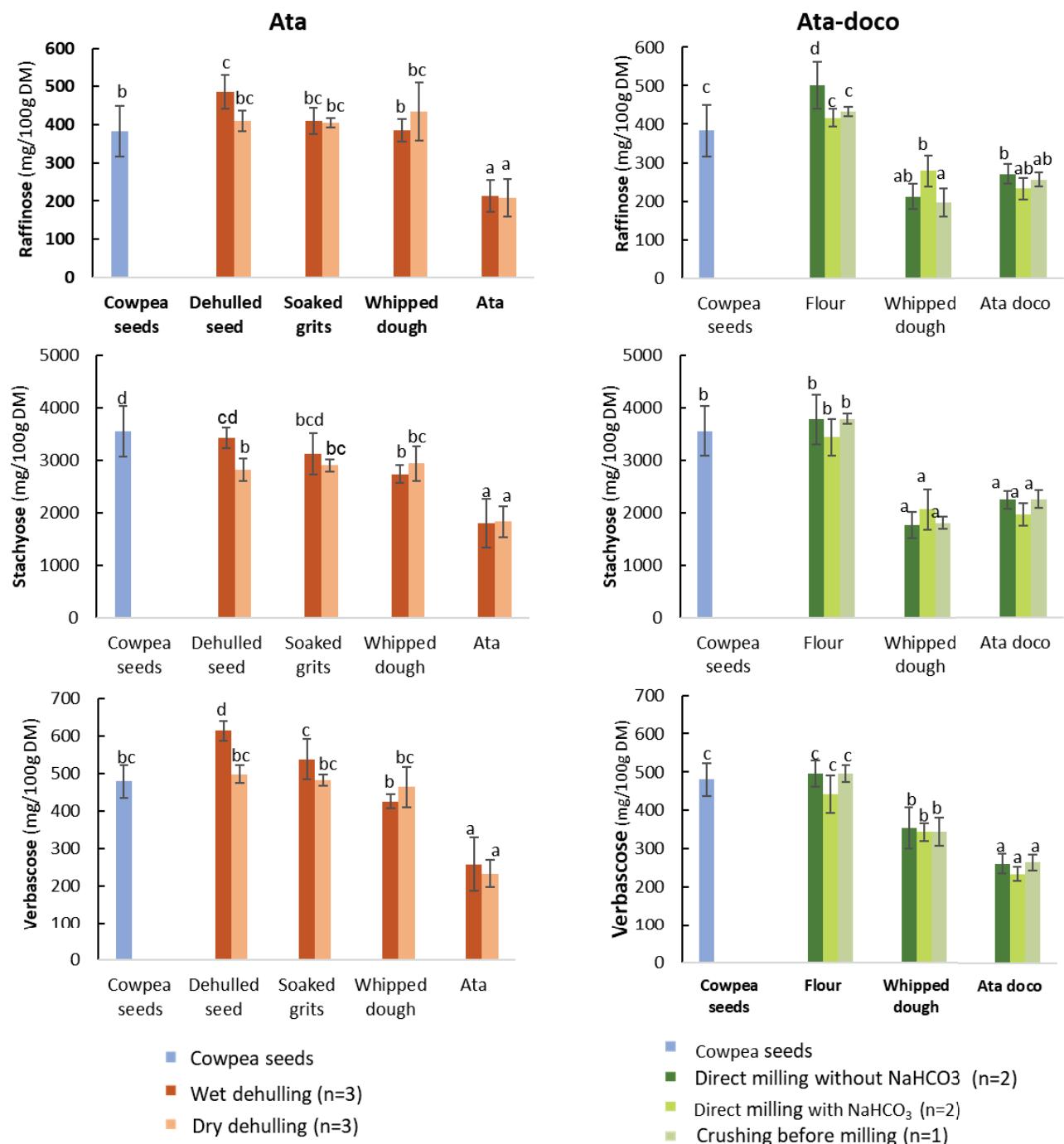


Fig 3. 5 : Raffinose, stachyose and verbascose content (on a dry matter basis) during Ata and Ata-doco) processing.

n: number of producers, Different superscript letters correspond to significant difference between samples ($p<0.05$, Newman-Keuls test was used for post-hoc comparison).

Variability in the total alpha-galacto-oligosaccharide content was mostly caused by the factor "producer" (>97 %) in ata doughnuts and by the factors "producer" (37 %) and "use of NaHCO₃" (33 %) in ata-doco. Specifically, the total mean alpha-galacto-oligosaccharide content was higher in ata-doco doughnuts prepared without than with NaHCO₃ (2764 mg.100 g⁻¹ DM vs. 2427 mg.100 g⁻¹ DM).

3.3. Mass balance of dry matter, folate and alpha-galacto-oligosaccharide during ata production

3.3.1. Dry matter

Dry matter losses and gains were observed during ata processing based on the dry dehulling process (variant presented on the left in Fig 3.4) (Fig 3.6). The dehulling step (i.e. coarse milling followed by washing and manual rubbing) resulted in an average loss of 16 % of the dry matter (8.6 % due to diffusion into the washing water and 7.1 % from the seed coats). Only one among the three producers performed two cycles of crushed-seed washing, but this did not result in a significant difference compared with the other producers because the second soaking water contained only 2% of the initial dry matter. After soaking, the amount of dry matter in the grits was about 78 % of the initial dry matter of cowpea seeds. After milling, on average, 60 % of the initial dry matter was recovered as dough, and 12 % was found in the water used for mill rinsing. The addition of the mill rinsing water to the dough, to adjust the dough consistency during whipping, allowed recovering, on average, 3% of dry matter. Oil absorption by the whipped dough during frying was highly variable, resulting in a mean dry matter gain of about 27 ± 16 %.

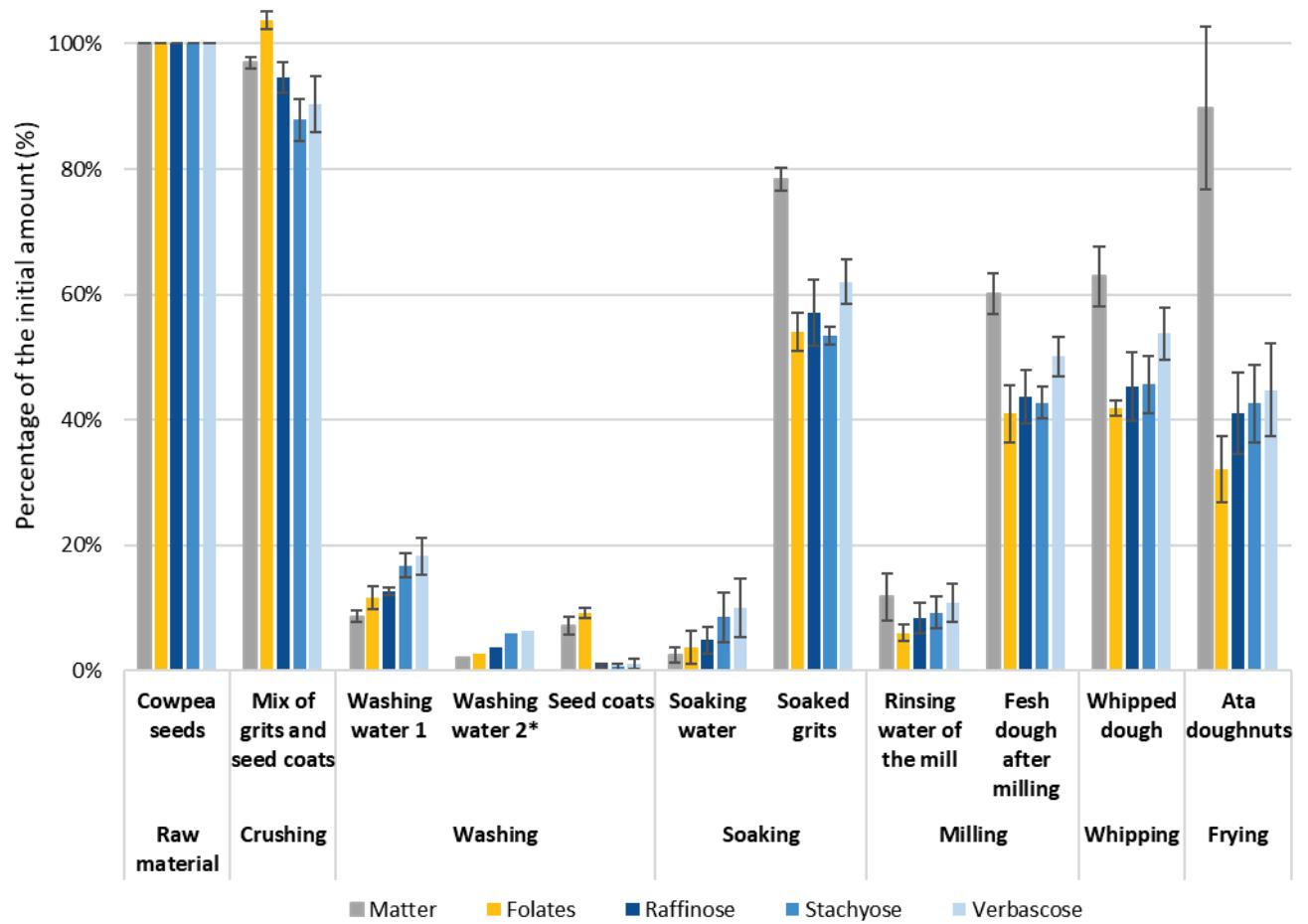


Fig 3. 6 : Dry matter, folate and alpha-galactoside distribution in the different production fractions during the traditional processing of Ata

(Calculated using the dry weight of each fraction and component content; data are the mean values for the samples collected from three producers). Oil: proportion of dry matter gained due to oil absorption during frying.

3.3.2. Folates

The initial total folate content of the cowpea seeds used for the mass balance assessment was $274 \mu\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ DM (Table 3.11), which was lower than that of the cowpea seeds used for the study of the processing variants (Table 3.10). Analysis of the distribution of the initial amount of folate in the different fractions generated during ata production (Fig 3.6) showed that approximately 24 % of the folate present in the cowpea seeds was found in the washing water and seed coat during the washing step. Indeed, it has been shown that folate vitamers in cowpea seeds are mainly concentrated in the embryonic axis (Coffigniez *et al.*, 2019b). As after dehulling and washing, the embryonic axis is discarded, this could explain part of the folate loss. Moreover, dehulling leads to the loss of fine particles from cotyledon, which are also washed out. After the soaking step, a loss of 26 % of the initial folate was recorded and only

Résultats : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets Ata et Ata-doco

4% was in the soaking water. The other 22 % might be due to folate degradation. Indeed, some of the folate vitamers are very sensitive to pH and oxygen (Xue *et al.*, 2011; Strandler *et al.*, 2015). Low pH and presence of oxygen can lead to oxidative degradation or cause conversion to other forms, sometimes without vitaminic activity (Coffigniez *et al.*, 2019b). In this study, milling resulted in an additional average loss of 13 % of the initial folate. The addition of the mill rinsing water, which contained about 6% of the initial folate, to the dough during whipping did not result in a significant difference between freshly milled dough (41 % of the initial folate) and whipped dough (42 %). Frying also strongly affected folate contents. However, the main part of the decrease observed was related to oil absorption by the dough during frying, and only approximately 10 % of the decrease could be explained by thermal degradation.

Tab 3. 11 : Dry matter, total folate and alpha-galactoside content in the different fractions during ata processing.

Fractions	Dry matter (g/100 g)	Folate (µg/100 g DM)	Raffinose (mg/100 g DM)	Stachyose (mg/100 g DM)	Verbascose (mg/100 g DM)
Cowpea seeds	89.5 ± 1.5 ^h	274 ± 9 ^c	469 ± 7 ^d	4150 ± 137 ^e	658 ± 19 ^c
Mix of grits and seed coats	90.7 ± 1.1 ^h	293 ± 15 ^{cd}	456 ± 37 ^d	3761 ± 195 ^{de}	614 ± 42 ^c
Washing water 1	2.3 ± 0.7 ^a	378 ± 28 ^{ef}	727 ± 132 ^e	7814 ± 749 ^f	1304 ± 190 ^d
Washing water 2*	0.7 ^a	348 ^{de}	797 ^f	11391 ^g	1931 ^e
Seed coats	20.2 ± 2.6 ^c	366 ± 49 ^{ef}	49 ± 11 ^a	330 ± 153 ^a	99 ± 46 ^a
Soaking water	1.0 ± 0.2 ^a	429 ± 147 ^f	963 ± 124 ^g	14840 ± 2527 ^h	2794 ± 559 ^f
soaked grits	43.0 ± 1.8 ^f	189 ± 15 ^b	342 ± 40 ^c	2825 ± 157 ^c	521 ± 45 ^c
Mill rinsing water	14.5 ± 3.1 ^b	152 ± 52 ^{ab}	336 ± 30 ^c	3290 ± 174 ^{cd}	608 ± 35 ^c
Freshly milled dough	38.8 ± 1.3 ^e	187 ± 21 ^b	340 ± 27 ^c	2952 ± 20 ^c	548 ± 22 ^c
Whipped dough	32.5 ± 1.8 ^d	183 ± 17 ^b	338 ± 41 ^c	3012 ± 174 ^c	562 ± 23 ^c
Ata doughnuts	54.4 ± 2.8 ^g	98 ± 8 ^a	214 ± 23 ^b	1965 ± 176 ^b	327 ± 42 ^b

Values in a same column with different superscript letters are significantly different ($p < 0.05$, Newman–Keuls test was used for post-hoc comparison).

Results are the mean ± standard deviation (samples were collected from 3 producers and analysed in triplicate for folate and in duplicate for alpha-galactoside and dry matter quantification).

*: Only producer P3 used two rounds of washing.

3.3.3. . Alpha-galacto-oligosaccharides

The initial amounts of raffinose, stachyose and verbascose were reduced by 5%, 12 % and 10 %, respectively, after dehulling (Fig 3.6). Moreover, 22 %, 32 % and 36 % of the initial amounts of raffinose, stachyose and verbascose, respectively, were found in the seed coats and washing water. After grits soaking, the amount of initial alpha-galacto-oligosaccharides found in the soaking water and soaked grits (the two fractions generated after this step) allowed deducing that 18–33% of the initial alpha-galacto-oligosaccharides were lost due to degradation. Moreover, an important increase of the initial amounts of galactose, glucose and fructose, which are alpha-galacto-oligosaccharide degradation products, was simultaneously observed (Figure 1S, supplementary data). The initial amount of these sugars increased by 23-fold for galactose, 33-fold for glucose, and 14-fold for fructose. The higher decrease in alpha-galacto-oligosaccharide content of the whipped doughs used for ata-doco (half the one of ata) observed during the study of the traditional processing variants could be explained by this higher production of galactose observed after grits soaking during ata production. Indeed, alpha-galactosidase activity can be reduced by the presence in the medium of some inhibitors, particularly galactose (Coffigniez *et al.*, 2018b). According to Dey and Pridham, (1969), 6.2 mmol.L⁻¹ and 25 mmol.L⁻¹ of galactose inhibit alpha-galactosidase activity by 70 % and 90 % respectively. Indeed, in our study, the galactose content of the raw material was 0.3 mmol.L⁻¹, and increased to 8.4 ± 1 mmol.L⁻¹ in the soaked grits, which were milled into dough (Figure 1S, supplementary data). After soaking, residual losses of alpha-galacto-saccharide were observed up to the frying step.

3.4. Potential contribution of ata and ata-doco to the recommended nutrient intakes

In West Africa, cowpea-based doughnuts are consumed for breakfast and as a snack food. The average adult serving is 3–4 doughnuts, which corresponds to approximately 100 g. The consumption of 100 g of ata and ata-doco provides 8.2 ± 0.9 g and 9.3 ± 0.8 g of protein (Table 4S, supplementary data). For an adult weighing 65 kg, such serving of ata and ata-doco would contribute to 15 and 17 % respectively of the recommended nutrient intake (RNI) for protein, which is estimated at 54 g of protein/day (FAO and WHO, 2007). The dietary fibre intake associated to the consumption of 100 g of both doughnuts would be around 4.9 ± 0.9 g and

5.9 ± 0.6 g for ata and ata-doco respectively. These values represent 16–20% of the daily fibre recommended intake which is estimated at 30 g per day by ANSES, (2016). This serving could also provide 8% and 13 % of the iron RNI, 11 % and 11 % of the zinc RNI, and 20 % and 26 % of the magnesium RNI for ata and ata-doco, respectively. Folate intake from 100 g of ata and ata-doco would represent 16 % and 24 % of the folate RNI that is estimated at 400 µg/day for adults (FAO and WHO, 2004). Based on these results both doughnuts can be regarded as a source of protein, dietary fibre, magnesium and folate (Codex, 1997). Calcium intake from both doughnut types is low (less than 4% of the RNI) (Table 5S, supplementary data). However, this serving also provides high amounts of lipids, much more elevated for ata (28 ± 5 g) than for ata-doco (15 ± 3 g).

4. Conclusion

This study highlighted the complex effects of traditional processing on the proximate composition, mineral, folate, phytate, and alpha-galacto-oligosaccharide contents of two cowpea-based doughnuts, and their variability in function of the doughnut type and processing variant. Part of these effects could be attributed to some processing parameters (e.g. soaking duration, milling type), but the role of the producers' practices remained significant, hindering the overall understanding of the whole processing effect. Mineral content was only slightly affected by the processing. Although folate losses were significant, the folate content in the final products was enough to qualify these doughnuts as a source of folate. Globally, ata-doco showed a better nutritional value than ata, with higher protein, fibre and folate and lower lipid contents. This work allowed identifying the processing steps that influence the nutritional quality of cowpea-based doughnuts, with the perspective of optimizing their preparation in the future. A study in controlled conditions could help to better understand and master the factors leading to folate and alpha-galacto-oligosaccharide losses due to degradation (around 20 %) during soaking. The important oil absorption observed during frying led to a passive reduction of the other nutrient contents. This high lipid intake counterbalances the nutritional interest of cowpea-based doughnuts. Therefore, more studies are also needed to determine the processing conditions to limit oil absorption.

CRediT authorship contribution statement

L. Akissoé: Investigation, Formal analysis, Visualization, Writing - original draft, Writing - review & editing. **Y.E. Madodé:** Conceptualization, Methodology, Writing - review & editing, Supervision. **Y.M. Hemery:** Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Visualization, Writing - review & editing, Supervision. **B.V. Donadjè:** Investigation, Formal analysis. **C. Icard-Vernière:** Conceptualization, Methodology, Writing - review & editing, Supervision. **D.J. Hounhouigan:** Conceptualization, Methodology, Writing - review & editing, Supervision, Project administration, Funding acquisition. **C. Mouquet-Rivier:** Conceptualization, Methodology, Writing - review & editing, Visualization, Supervision, Project administration, Funding acquisition.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgment

This work was carried out in the framework of the projects ICOWPEA and TransNut-Niébé funded by the French government through the French National Research Agency (ANR) under the “Investissements d’avenir” program with the references ID1507-031 (Grant number: ANR-10-LABX-0001-01; Agropolis Fondation) and ANR-16-IDEX-0006 (I-Site MUSE), respectively.

The authors wish to thank C. Picq, I. Rochette, and C. Sogbossi for their technical assistance.

3.3.2. Synthèse et perspective

Au cours de la fabrication des beignets Ata et Ata-doco, les minéraux tels que zinc, calcium et magnésium étaient faiblement impactés. Cependant, une contamination en fer a été observée au cours des deux procédés et serait associée à l'étape de mouture. Les phytates semblent être moins impactés au cours des deux procédés. Cependant, l'étape de battage a entraîné une légère diminution la teneur en phytates.

Concernant les folates, le trempage des graines décortiquées au cours du procédé de Ata a entraîné une diminution de leur teneur.

Une perte des alpha-galactosides a été observée au cours du procédé de Ata après l'étape de trempage des gritz de niébé. Au cours du procédé de Ata-doco, une diminution des teneurs a été observée après l'étape de battage et l'action de l'alpha-galactosidase endogène à la graine est suspectée.

Globalement au niveau des deux types de beignets, l'imprégnation en huile suite à l'étape de friture a entraîné une diminution plus importante des teneurs des différents composés étudiés après la friture au niveau de beignets Ata que Ata-doco.

Au regard des résultats obtenus dans cette partie, les étapes de trempage et de friture ont été identifiées pour être étudiés en laboratoire afin de mieux comprendre les mécanismes entraînant des pertes de nutriments. Pour l'étape trempage, nous avons étudié le comportement des alpha-galactosides et de la thiamine (car nous avons pu finaliser la mise au point de la méthode de dosage). L'étude n'a pas été réalisée sur les folates en raison de la rupture complète du milieu de culture utilisé pour le dosage microbiologique. Pour l'étape de friture, la thiamine et les lipides. Le but visé dans le choix de ces composés était de trouver des conditions technologiques permettant de réduire les pertes de nutriments ayant un intérêt positif (thiamine) et favoriser la diminution des composés indésirables (alpha-galactosides et lipides).

3.4. Etude du comportement de la thiamine et des alpha-galactosides au cours du trempage des gritz de niébé : Modélisation des phénomènes diffusifs

Ce travail a été mené en collaboration avec l'équipe 3 de l'UMR QualiSud (CIRAD) avec la participation de : Nawel Achir, Christian Mestres et Erica Siguemoto.

Une publication est envisagée ultérieurement pour valoriser ces résultats.

1. Introduction

Comme présenté dans les chapitres précédents, les légumineuses sont à promouvoir dans l'alimentation humaine en raison de leur composition en éléments nutritifs. Elles sont riches en fibres, protéines, vitamines et certains composés bioactifs présentant des activités biologiques importantes (Çakir *et al.*, 2019). Le niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) est l'une des légumineuses les plus consommées en Afrique de l'Ouest, mais comme d'autres légumineuses, il contient également des facteurs antinutritionnels, tels que les alpha-galactosides, limitant sa consommation. Cependant, des techniques de cuisson spécifiques peuvent être utilisées pour réduire ou éliminer ces composés au cours de la transformation des graines de niébé (Yadav *et al.*, 2018).

La présente étude s'inscrit dans la continuité des travaux présentés dans le chapitre précédent, portant sur l'influence des procédés de production sur la valeur nutritionnelle des beignets traditionnels Ata obtenus à partir de graines de niébé décortiquées. Ce procédé comprend plusieurs étapes tels que le décorticage, le lavage, le trempage, le broyage, le battage et la friture. L'étude précédente a montré l'impact du trempage des graines décortiquées sur les teneurs en folates et en alpha-galactosides, mais en raison de la variabilité liée aux pratiques des productrices, les mécanismes responsables de cet effet n'ont pas été bien élucidés (Akissoé *et al.*, 2021). Tout comme les teneurs en folates, les teneurs en thiamine (vitamine B1) pourraient être influencées par le trempage des gritz de niébé, du fait de la nature hydrosoluble de la vitamine B1 favorisant les pertes par diffusion (Kozempel *et al.*, 1982). La stabilité de la thiamine pendant les procédés de transformation dépend des conditions de chauffage (le pH, la température, type de milieu). Andersson and Öste, (1994) ont montré que la diffusivité apparente de la thiamine était élevée dans un tampon citrate/acide

Résultats complémentaires : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets

chlorhydrique (pH 4) que dans un tampon phosphate (pH 7). Ils ont également observé une augmentation de la diffusivité avec la montée en température. Dans quatre différents modèles alimentaires – avec des teneurs en eau et activités de l'eau (a_w) se situant dans la gamme des aliments à humidité intermédiaire– Arabshahi and Lund, (1988) ont montré que la vitesse de dégradation de la thiamine diminuait avec une augmentation de a_w et n'était pas affecté par la concentration en oxygène du milieu.

Le trempage est une opération unitaire faisant partie de plusieurs procédés tels que la cuisson, la germination et la fermentation. Cette opération est présente dans les procédés traditionnels de transformation du niébé utilisés pour la préparation des ragoûts et des beignets à base de niébé (Madode, 2012; Coffigniez, 2018). Elle consiste à immerger les graines dans l'eau jusqu'à ce qu'elles absorbent un volume d'eau maximal. Le comportement des graines dépend de différents facteurs tels que l'espèce et la variété, la durée du procédé, la température, le pH, la salinité du milieu de trempage, et les conditions de stockage de la graine (Prodanov *et al.*, 1997). Le trempage des graines peut s'accompagner de la diffusion de composés solubles (Kaptso *et al.*, 2008) comme les vitamines hydrosolubles du groupe B. La thiamine est l'une des principales vitamines hydrosolubles présente dans le niébé. Cette vitamine joue un rôle important dans le métabolisme des glucides lors de la production d'énergie et les manifestations de sa carence sont le béribéri et le syndrome de Wernicke-Korsakoff (Bettendorff, 2013). Bien que plusieurs études aient été réalisées sur l'effet du trempage des légumineuses sur d'autres vitamines hydrosolubles (telles que les folates) et sur des composés indésirables comme les alpha-galactosides provoquant des problèmes de flatulence (Coffigniez, 2018; Xue *et al.*, 2011; Dang, 2000; Uzogara *et al.*, 1991), peu d'études ont été réalisées sur le comportement de la thiamine pendant le trempage et la cuisson des graines de niébé (Edijala, 1980b,a) ou d'autres légumineuses (le pois chiche, la lentille et le haricot) (Prodanov *et al.*, 2004). De plus, les études sur le trempage du niébé ont été réalisées sur les graines entières et non sur les graines décortiquées.

Dans le cadre de notre étude, plusieurs hypothèses ont été émises sur le comportement de la thiamine et des alpha-galactosides au cours du trempage des gritz de niébé (Fig 3.7). La thiamine pourrait être influencée par des réactions enzymatique et/ou thermique, et la perte par diffusion dans le milieu de trempage. Les alpha-galactosides pourraient subir des dégradations enzymatiques ou diffusés dans l'eau. Des inter-conversions entre vitamères de thiamine (par hydrolyse des formes phosphorylées), et la production d'alpha-galactosides

Résultats complémentaires : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets

(raffinose à partir du stachyose ou stachyose à partir du verbascose) pourraient avoir lieu par dégradation des molécules à chaîne plus longue. Au cours du trempage, les enzymes de dégradation de la thiamine et des alpha-galactosides pourraient être actives dans l'eau de trempage et dans les gritz. Pour cela, l'objectif de cette étude a été i) de comprendre le comportement de la thiamine et des alpha-galactosides au cours du trempage des gritz de niébé, sur la base de bilans molaires, et en utilisant une approche de modélisation à l'aide d'équations empiriques, en vue de ii) proposer des conditions optimales de trempage permettant de réduire les teneurs en alpha-galactosides et de limiter les pertes en thiamine.

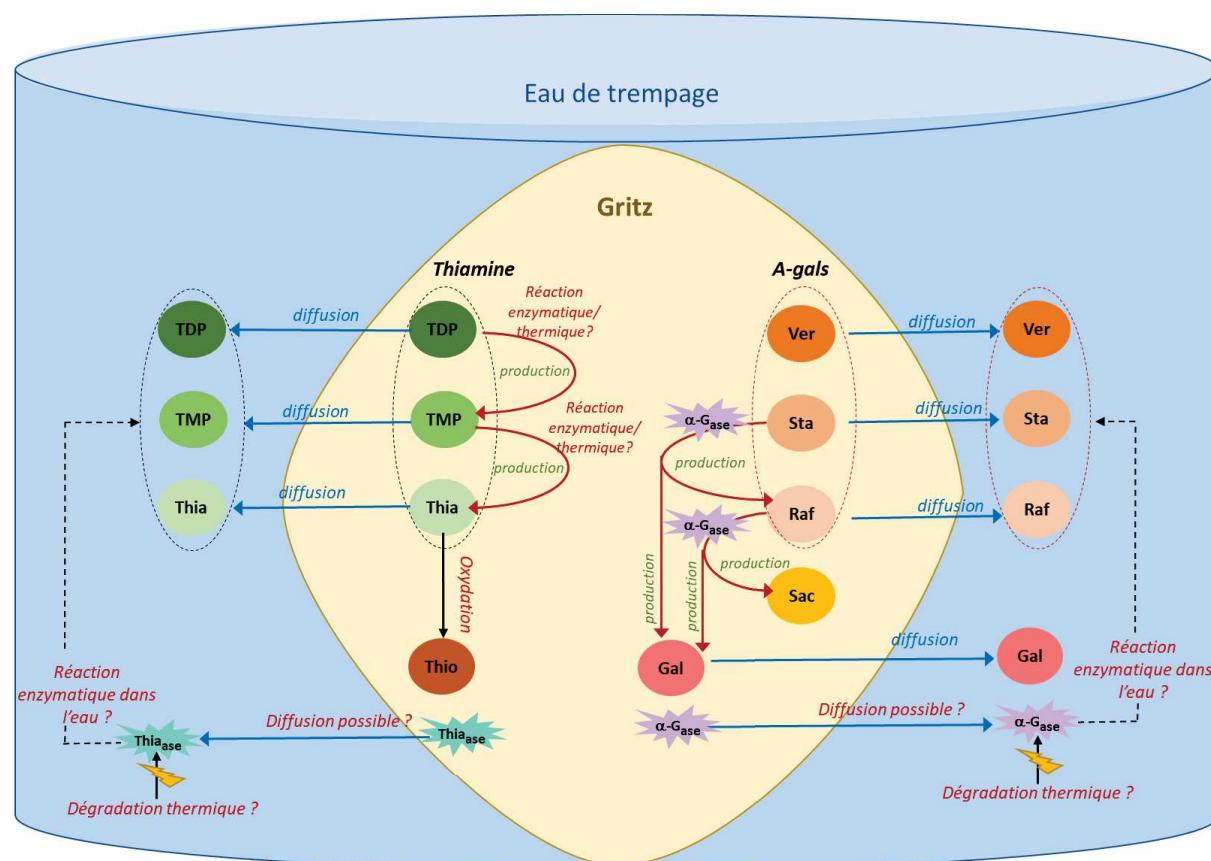


Fig 3. 7 : Schéma hypothétique de réaction-diffusion des vitamères de thiamine et des alpha-galactosides au cours du trempage.

TDP : Thiamine disphosphate, TMP : Thiamine monophosphate, Thia : Thiamine libre, Thio : Thiochrome, A-gals : Alpha-galactosides, Ver : Verbascose, Sta : Stachyose, Raf : Raffinose, Sac : Saccharose, Gal : Galactose, α-G_{ase} : Alpha-galactosidase, Thia_{ase} : Thiaminase.

2. Matériel et méthodes

2.1. Matériel végétal et préparation des gritz

La variété blanche de niébé (Atchawé-Tola), cultivée au Bénin a été utilisée dans le cadre de cette étude. Les teneurs en matières sèches et en alpha-galactosides de la matière première étaient respectivement 87% et 6005 mg/100 g MS (407 mg/100 g MS pour le raffinose, 4886 mg/100 g MS le stachyose et 712 mg/100 g MS pour le verbascose). Les teneurs des différents vitamères de la thiamine étaient de 3,6 µg/g MS pour la forme mono-phosphorylée (TMP), 1,2 µg/g MS pour la forme di-phosphorylée (TDP) et 1,0 µg/g MS pour la thiamine libre.

Les gritz de niébé ont été obtenus par concassage à l'aide d'un moulin à meules commercial. Les gritz ont ensuite été lavés avec un ratio graines/eau de 1/5 afin d'éliminer les particules fines ainsi que les enveloppes. Après 5 à 6 cycles de lavage, les gritz ont été égouttés pendant 5 min à l'aide d'un chinois de cuisine.

2.2. Cinétique de trempage des gritz de niébé

Le trempage des gritz lavés a été effectué à l'aide d'un bain-marie avec agitation (Grant OLS Aqua Pro). Environ 80g de gritz lavés ont été mis dans un bécher contenant 320 mL d'eau déminéralisée (ratio graine : eau ; 1 : 4 ; g/ml), ramenée préalablement à la température de trempage. Les essais ont été réalisés pendant 10 min, 20 min, 30 min et 60 min respectivement à 5°C, 15°C, 30°C, 45°C et 60°C. Après chaque trempage, l'eau résiduelle a été éliminée par égouttage pendant 5 min à l'aide d'un chinois de cuisine.

2.3. Dimensions des gritz et détermination du rayon

La détermination des dimensions (épaisseur, longueur, largeur) a été réalisée sur des gritz lavés, qui représentaient le produit initial utilisé pour la cinétique de trempage. Les mesures ont été effectuées sur 100 gritz lavés à l'aide d'un pied à coulisse numérique. Sur la base de la forme des gritz (Fig 3.8), leur géométrie a été assimilée à celle d'un parallélépipède. Les valeurs moyennes des dimensions mesurées sur les 100 gritz lavés ont donc été utilisées pour calculer la surface d'un parallélépipède moyen (S_p) ainsi que le volume d'un parallélépipède moyen (V_p).

Dans le cadre de notre étude, comme dans d'autres études antérieures ayant porté sur le riz ou sur les graines de niébé entières, la forme des gritz a cependant été supposée comme étant sphérique, pour faciliter les calculs (Briffaz, 2013; Coffigniez, 2018). En considérant V_s et S_s

comme étant respectivement le volume et la surface des particules sphériques, nous avons déterminé le rayon des gritz en minimisant le carré des écarts entre les ratios V_S/S_S et V_P/S_P .



Fig 3. 8 : Gritz lavés de niébé

2.4. Analyses biochimiques

• Vitamine B1

La détermination de la vitamine B1 a été réalisée par hydrolyse acide, suivie d'une oxydation de la thiamine en thiochrome et d'une séparation chromatographique en UPLC avec détection par fluorimétrie (excitation à 365 nm, émission à 435 nm), selon la méthode proposée par Schmidt *et al.*, (2017) avec quelques modifications.

Un gramme de gritz trempés ou 5 ml d'eau de trempage ont subi une hydrolyse acide avec du HCl 0,1 N à 100°C (volume total 40 mL) pendant 1h. Après cette étape, les échantillons ont été centrifugés à 8500 Rpm pendant 15 min à 4°C. Après centrifugation, 2,5 mL de chaque surnageant ont ensuite été prélevés, afin d'être oxydés pendant 2 min avec de l'hexaferranocyanure de potassium pour obtenir du thiochrome. La réaction d'oxydation a été arrêtée avec 800 µL d'acide ortho-phosphorique à 85%.

La séparation et la quantification de la thiamine (T), de la thiamine monophosphate (TMP) et de la thiamine disphosphate (TDP) dans les échantillons oxydés a été effectuée à l'aide d'une chaîne UPLC Acquity™ (Waters, Milford, MA, USA) équipée d'un détecteur par fluorescence

et d'une colonne HSS T3 (100 mm x 2,1 mm i.d., 1,7 lm). La température de la colonne a été réglée à 40°C. La phase mobile était constituée d'un gradient de tampon acétate de sodium (15 mmol) et de méthanol tel que décrit par Schmidt *et al.*, (2017), appliqué à un débit de 0,42 ml/min avec une durée d'analyse de 6 min après injection de 4 µL de l'échantillon. La quantification de T, TMP et TDP a été effectuée en utilisant respectivement de la thiamine hydrochloride, de la thiamine monophosphate chloride dihydrate et la thiamine pyrophosphate comme standards. Pour déterminer la teneur totale de thiamine, les différents vitamères quantifiés ont été converties en équivalent de thiamine libre.

- **Sucres**

Les teneurs en galactose et en alpha-galactosides ont été déterminées après extraction dans l'éthanol (80%, v/v) et séparation chromatographique comme décrit par Akissoé *et al.*, (2021).

2.5. Bilan molaire dans les gritz initiaux et eau de trempage-gritz trempés

Pour les différents composés étudiés, afin de suivre une démarche mécaniste et d'évaluer précisément les proportions de molécules dégradées, produites, ou ayant diffusé dans l'eau de trempage, un bilan molaire a été réalisé par comparaison du nombre de moles initial (présent dans les gritz lavés) à la somme des nombres de moles présents après un temps *t* de trempage aux différentes températures dans i) les gritz trempés, et ii) dans l'eau de trempage.

2.6. Modélisation de la diffusion de la thiamine et des alpha-galactosides dans l'eau de trempage

2.6.1. Modèles mathématiques

Lors de l'étude du comportement des différents composés dans l'eau de trempage, les considérations (hypothèses) suivantes ont été prises en compte :

- Les gritz sont supposés de forme sphérique.
- Les gritz constituent un mélange homogène de matière sèche et d'eau (c'est-à-dire qu'il n'y a pas de gradient de teneur en eau au sein d'un gritz, du fait de leur faible taille).
- L'absorption d'eau par les gritz pendant le trempage est négligeable.
- La concentration à l'équilibre de chaque composant est constante quelle que soit la température.

- **Modèle n°1**

Nous avons utilisé un modèle modifié de la loi de Fick adapté pour les particules sphériques en suspension dans un milieu homogène (Perez *et al.*, 2011b). La forme simplifiée du modèle est :

$$\frac{C_t}{C_\infty} = 1 - A \exp(-B_1 t) \quad (1)$$

Avec :

$$A = \left(1 - \frac{C_0}{C_\infty}\right) A_1 \exp(B_1 t_0) \quad (2)$$

Et A_1 et B_1 des coefficients adaptés au particules de formes sphériques

$$A_1 = \frac{6}{\pi^2} \quad (3)$$

$$B_1 = \frac{D_{eff}\pi^2}{R^2} \quad (4)$$

En remplaçant les équations 2, 3 et 4 dans l'équation 1 on obtient :

$$C_t = C_\infty \left[1 - \left[\left(1 - \frac{C_0}{C_\infty}\right) \frac{6}{\pi^2} \exp\left(\frac{D_{eff}\pi^2}{R^2} t_0\right) \right] \exp\left(\frac{-D_{eff}\pi^2}{R^2} t\right) \right] \quad (5)$$

Où t est le temps de diffusion, C_t et C_∞ représentent les concentrations à un temps t donné et à l'équilibre, D_{eff} le coefficient de diffusion et r le rayon des particules de formes sphériques. Ce modèle prend en compte le phénomène non-diffusif lié au lavage du composé dans l'eau de trempage dès les premiers instants d'immersion (à $t=t_0$, $C=C_0$). En effet, les composés présents à la surface des gritz vont être solubilisés immédiatement dans l'eau dès le début du trempage, sans que cela soit à proprement parler un phénomène diffusif.

- **Modèle n°2**

Le modèle de second ordre de la « loi cinétique » proposé par Syamsiah and Marseno, (2016) a également été utilisé :

$$\frac{dC_t}{dt} = k(C_e - C_t)^2 \quad (6)$$

Où k est la constante de vitesse à une température donnée, C_e la concentration du composé (thiamine, raffinose, stachyose ou verbascose) à l'équilibre dans l'eau de trempage et C_t la concentration à un temps (t) donné.

La séparation des variables de l'équation (6) et son intégration avec les conditions initiales et limites suivantes $C_t=0$ à $t=0$ et $C_t=C_e$ à $t = t$ donne l'équation non linéaire :

$$C_t = \frac{C_e^2 kt}{1+C_e kt} \quad (7)$$

Résultats complémentaires : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets

Le coefficient de diffusion peut être déterminé avec une équation analogue à la loi de Fick (Kaptso *et al.*, 2008; Perez *et al.*, 2011b):

$$k = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \quad (8)$$

Où D_{eff} représente le coefficient de diffusion, k la constante de vitesse et r le rayon de la matrice étudiée.

En remplaçant l'équation (8) dans (7) on obtient :

$$C = \frac{C_e^2 \pi^2 D_{eff} t}{(r^2 + C_e^2 \pi^2 D_{eff} t)} \quad (9)$$

Les unités relatives à chaque paramètre, pour les différents composés, sont présentées dans le tableau ci-dessous (Tab 3.12).

Tab 3. 12 : Unités des paramètres

Paramètres		Unités	
		Thiamine	Alpha-galactosides
D_{eff}	Coefficient de diffusion	$m^2 \cdot min^{-1}$	$m^2 \cdot min^{-1}$
C_e	Concentration à l'équilibre	$\mu g \cdot L^{-1}$	$mg \cdot L^{-1}$
C_t	Concentration à t	$\mu g \cdot L^{-1}$	$mg \cdot L^{-1}$
T	Durée de trempage	Min	Min

2.6.2. Dépendance du coefficient de diffusion (D_{eff}) à la température

La variation de D_{eff} en fonction de la température peut être exprimée suivant une équation de type Arrhenius :

$$D_{eff} = D_0 \exp \left[\frac{-E_a}{R(T+273,15)} \right] \quad (10)$$

Avec D_0 ($m^2 \cdot min^{-1}$) le coefficient de diffusion à une température infinie, E_a une constante, R la constante des gaz parfaits ($8,31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) et T ($^{\circ}\text{C}$) la température de trempage.

2.6.3. Résolution numérique et détermination des incertitudes

Les équations 5 et 9 respectivement du modèle 1 et 2 ont été utilisés pour déterminer les concentrations à l'équilibre ainsi que les coefficients de diffusion. Les solutions ont été déterminées avec l'outil « solveur » du logiciel Excel. Les paramètres ont été déterminés par ajustement des données expérimentales aux données prédictes, réalisé de sorte à minimiser la

somme des carrées de écarts (SCE) entre les valeurs expérimentales et les données estimées. Les incertitudes des paramètres ont été déterminées à l'aide de la macro proposée par de Levie, (2012).

2.7. Analyse statistique

Une analyse de variance à un facteur, suivie d'un test de Newman Keuls, a été réalisée pour comparer le nombre de mole initial de chaque composé (au temps initial dans les gritz) au nombre de mole final (i.e. somme des moles présentes dans les gritz et dans l'eau de trempage) après 1h de trempage. Le seuil de significativité a été fixée à $p<0,05$.

3. Résultats

3.1. Taille des gritz lavés et absorption d'eau au cours du trempage

Taille des gritz. Une large variation a été observée au niveau de la taille des particules et la forme des gritz lavés qui ont été utilisés pour la cinétique de trempage (Fig 3.8). En moyenne, les dimensions des grains lavés étaient de $4,8 \pm 2$ mm, $3,1 \pm 1$ mm, $1,4 \pm 0,3$ mm pour la longueur, la largeur et l'épaisseur respectivement. Un rayon sphérique équivalent de 1,2 mm a donc été déterminé pour les grains.

Absorption d'eau. Nous avons observé qu'après l'étape de lavage, les gritz de niébé avaient absorbé plus de 8 fois leur volume initial. En effet, la teneur en eau de la matière première (niébé non lavé) était d'environ 0,1 g eau/g (base sèche). En moyenne, la quantité d'eau dans les gritz lavés avant le trempage était de 0,8 g eau/g MS (Fig 3.9). Au cours de l'étape de trempage, après 10 minutes, une augmentation de 60 à 80 % de la quantité d'eau a été observée pour les gritz trempés. Ensuite, entre 10 min et 1h de trempage, le volume d'eau dans les gritz était resté constant et variait entre 1,3 et 1,6 g eau/g MS.

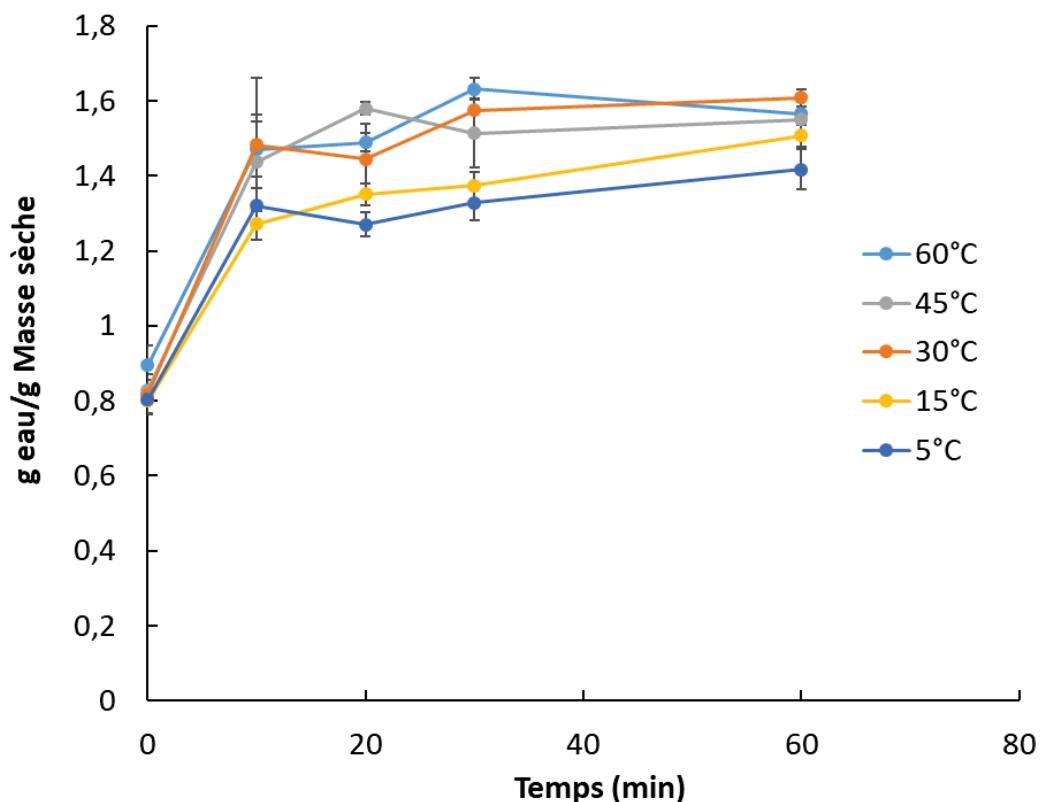


Fig 3. 9 : Capacité d'absorption d'eau par les gritz au cours du trempage

3.2. Evolution des teneurs en composés d'intérêt dans les gritz et l'eau de trempage : données expérimentales

3.2.1. Evolution des teneurs en alpha-galactosides et galactose

L'évolution des teneurs en alpha-galactosides et en galactose dans l'eau de trempage et dans les gritz est présentée par les figures 3.10 et 3.11, respectivement. Les teneurs initiales dans les gritz lavés (base sèche) étaient de 667 mg/100 g, 3970 mg/100 g, 438 mg/100 g et 20 mg/100 g respectivement pour le verbascose, le stachyose, le raffinose et le galactose. Entre 5°C et 45°C, les teneurs en alpha-galactosides ont légèrement varié dans les gritz trempés ainsi que dans l'eau de trempage. Cependant, après 60 minutes de trempage à 60°C, une réduction de 66, 69, et 71% a été mise en évidence dans les gritz trempés pour le verbascose, le stachyose et le raffinose, respectivement. Concernant le galactose, une augmentation a été observée dans les gritz trempés ainsi que dans l'eau de trempage, quelle que soit la température de trempage, suggérant une production de galactose.

3.2.2. Evolution des teneurs en vitamères de thiamine

Les figures 3.12 et 3.13 montrent l'évolution de la thiamine libre (T), de la thiamine monophosphate (TMP) et de la thiamine diphosphate (TDP) respectivement dans l'eau de trempage ($\mu\text{g/L}$) et les gritz trempés ($\mu\text{g/g DM}$), en fonction de la durée de trempage, et aux différentes températures. Avant le trempage, les teneurs initiales de ces différents vitamères de thiamine étaient de $4,1 \pm 0,3 \mu\text{g/g}$, $0,5 \pm 0,1 \mu\text{g/g}$ et $2,6 \pm 0,2 \mu\text{g/g}$ respectivement pour la TMP, la TDP et la T.

Dans l'eau de trempage, la teneur en TDP a augmenté au bout de 10 min et était en moyenne de $10 \mu\text{g/L}$, pour des températures de trempage entre 5°C et 45°C . Ensuite, les teneurs en TDP évoluaient peu entre 10 min et 1h de trempage aux basses températures (5°C et 15°C), tandis qu'une réduction de la teneur en TDP a été observée avec l'augmentation de la température. A 30°C et 45°C , la réduction de la teneur en TDP s'est produite respectivement après 20 min et 30 min de trempage, et une diminution complète a été observée au bout d'1h de trempage à ces deux températures. Lors du trempage à 60°C , la TDP n'était plus quantifiable dans l'eau dès les premières minutes de trempage. Pour ce qui concerne l'évolution des deux autres vitamères, l'augmentation de la température de trempage a entraîné une augmentation de la TMP et de la T dans l'eau de trempage (Fig 3.12).

Au niveau des gritz trempés, les teneurs en TDP et TMP ont faiblement diminué entre 5°C et 45°C . Cependant, à 60°C , une réduction des deux formes phosphorylées a été observée au début du trempage, et une diminution complète a été observée après 30 min et 1h de trempage pour le TDP et le TMP, respectivement. Pour la thiamine libre (T), une augmentation d'environ 56 % de la teneur initiale a été observée après 10 min de trempage et les valeurs sont restées stables jusqu'à 1h de trempage aux différentes températures.

Résultats complémentaires : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets

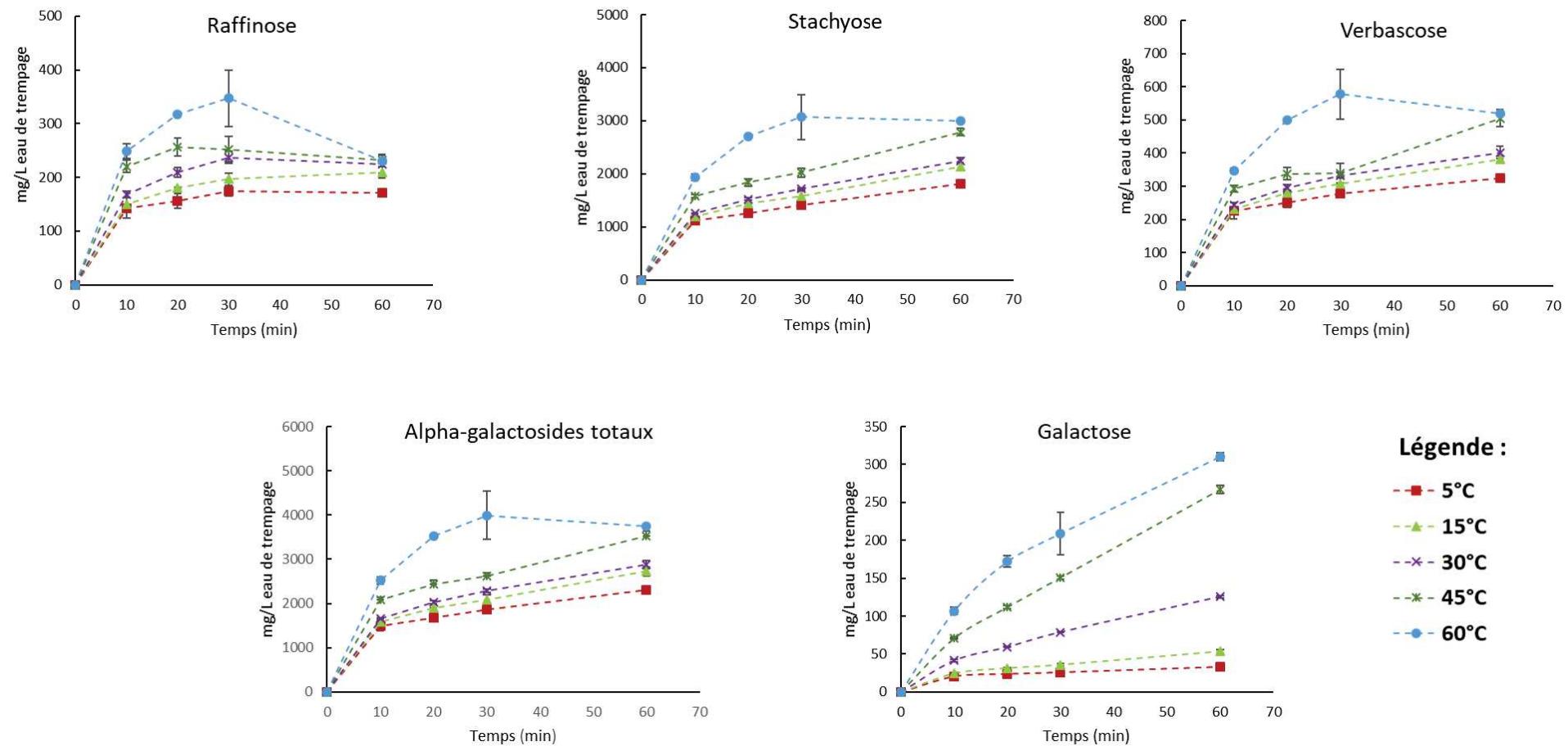


Fig 3. 10 : Données expérimentales des alpha-galactosides et du galactose dans l'eau de trempage

Résultats complémentaires : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets

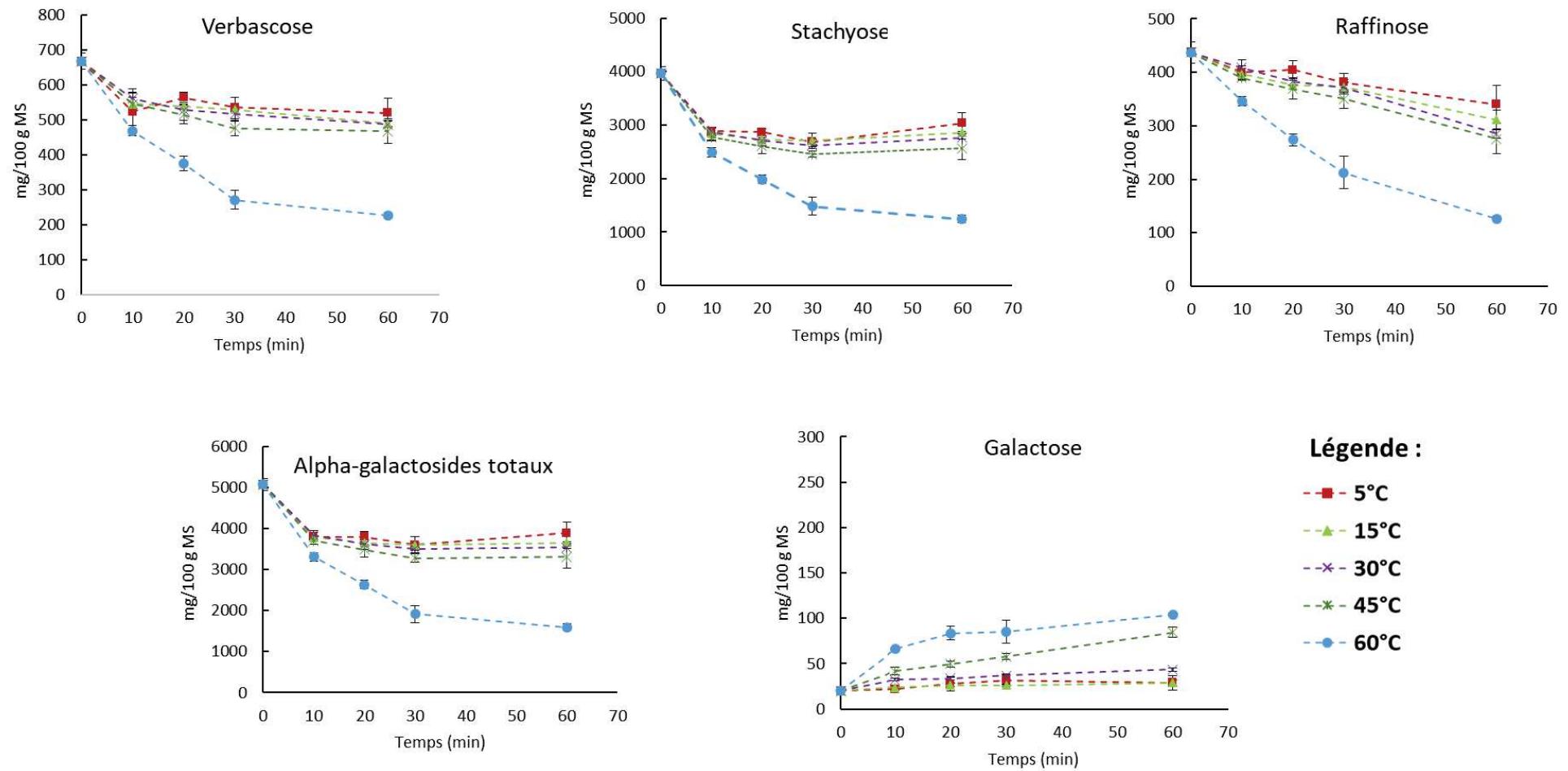


Fig 3. 11 : Données expérimentales des alpha-galactosides et du galactose dans les gritz trempés

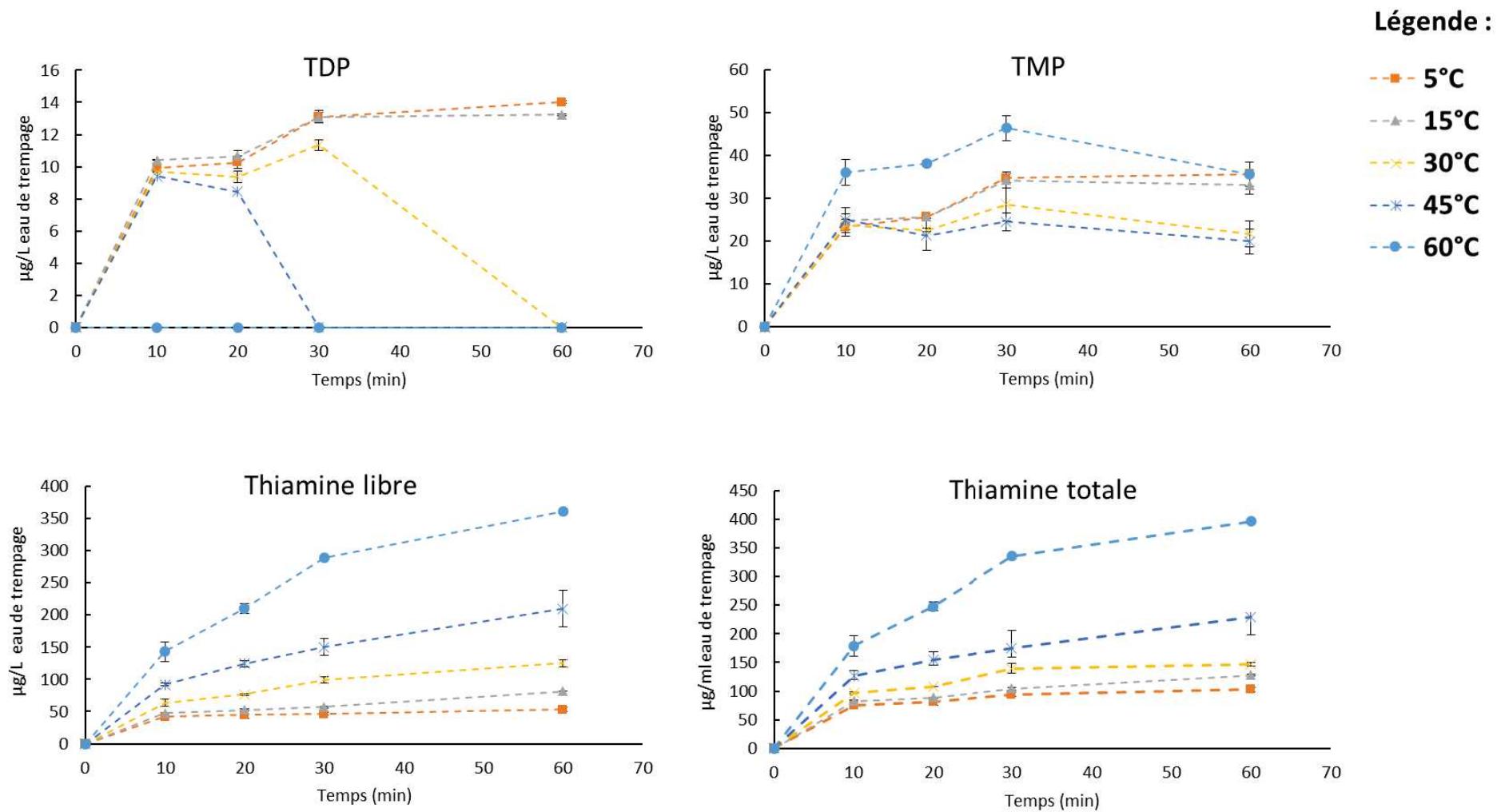


Fig 3.12 : Données expérimentales de la Thiamine disphosphate (TDP), Thiamine monophosphate (TMP) et de la thiamine dans l'eau de trempage

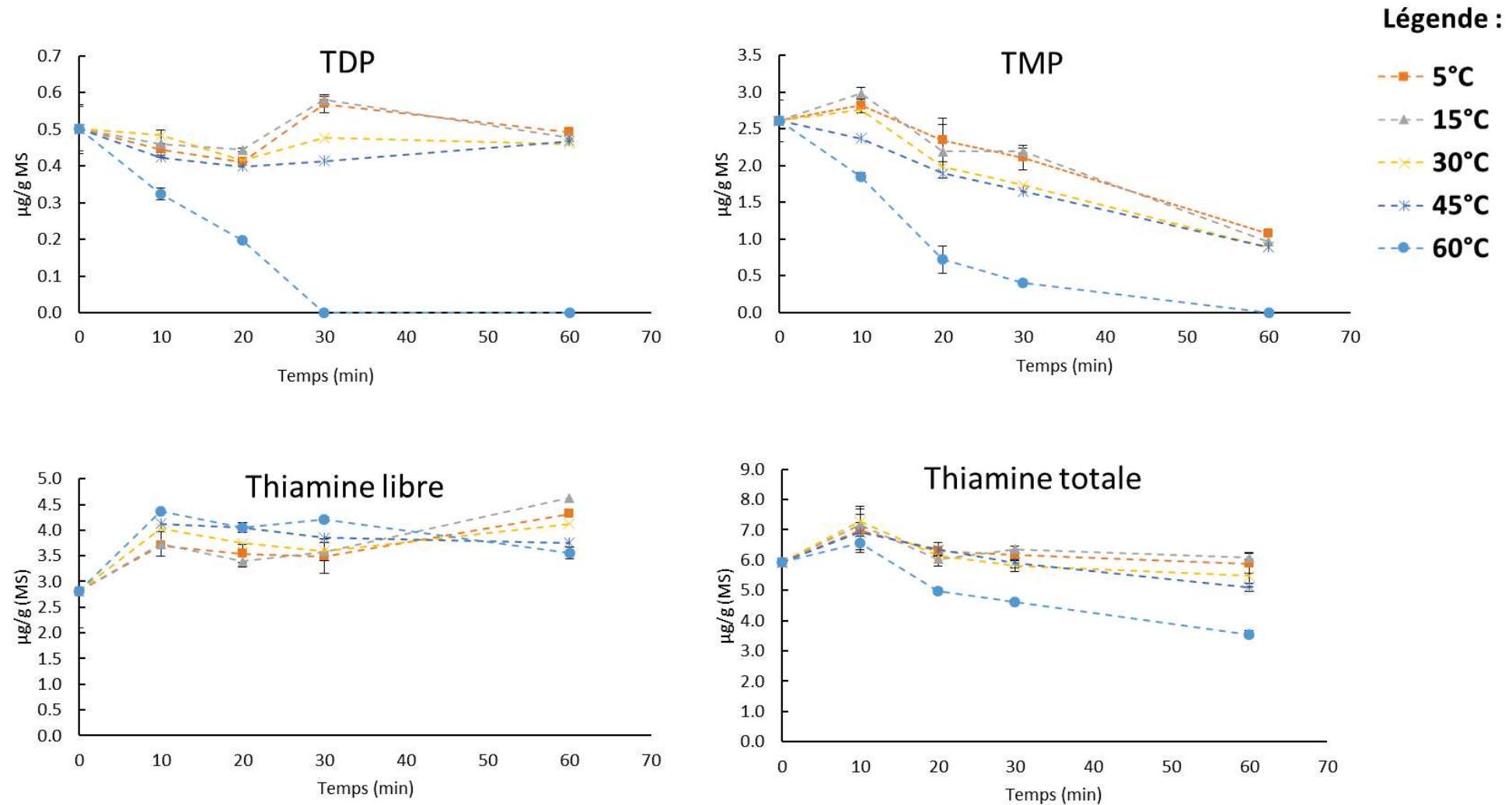


Fig 3. 13 : Données expérimentales de la TDP, TMP et de la thiamine dans les gritz trempés

3.3. Bilan molaire : suivi des vitamères de thiamine et des alpha-galactosides au cours du trempage

Le tableau 3.13 présente la répartition (en pourcentages) du nombre de moles de thiamine totale (somme des nombres de moles des 3 vitamères) et des alpha-galactosides totaux dans les gritz trempés et dans l'eau de trempage, calculés comparativement aux nombres de moles initiaux relevés dans les gritz lavés. Pour les deux types de composés, les sommes des pourcentages molaires (gritz + eau) étaient proches de 100%. Cependant, une variation de leur distribution a été observée au sein des deux milieux (diminution dans les gritz trempés, vs. augmentation dans l'eau de trempage) en fonction du temps et de la température, avec des proportions plus élevées dans l'eau de trempage après 1h de trempage à 60°C, comparativement aux autres couples « temps/températures ».

La figure 3.14 montre la distribution des nombres de moles de TDP, TMP, thiamine libre, alpha-galactosides et galactose dans les gritz trempés et l'eau trempage, au bout de 1h de trempage. A 60°C, une diminution complète de la TDP a été observée par rapport à la valeur initiale dans les gritz lavés. Concernant la TMP, la réduction s'est produite à toutes les températures avec une diminution plus importante à 60°C par rapport aux autres températures. Contrairement aux formes phosphatées, une augmentation du nombre de moles de thiamine libre a été observée avec la montée en température, montrant bien les inter-conversions entre vitamères.

Concernant les alpha-galactosides, le bilan molaire effectué après 1h de trempage a principalement montré de diminution du raffinose (avec une variation plus importante à 60°C) et de faibles variations pour le stachyose et le verbascose. Pour le galactose, principal produit de dégradation des alpha-galactosides, nous avons observé une augmentation du nombre de moles en fonction de la température.

Tab 3. 13 : Distribution du nombre de mole initial de la thiamine totale dans les gritz trempés et dans l'eau de trempage (%)

Température (°C)	Thiamine				Alpha-galactosides totaux		
	Temps	Gritz	Eau	Gritz + Eau	Gritz	Eau	Gritz + Eau
5	10	108 ± 15	8 ± 0,3	116 ± 4	75 ± 2	20 ± 1	94 ± 3
	20	102 ± 2	8 ± 0,7	110 ± 2	76 ± 0,1	21 ± 1	98 ± 1
	30	95 ± 2	10 ± 0,4	105 ± 3	68 ± 1	24 ± 1	93 ± 1
	60	91 ± 6	11 ± 0,3	102 ± 6	74 ± 7	30 ± 0	104 ± 7
15	10	114 ± 1	9 ± 0,3	112 ± 15	74 ± 1	21 ± 0,1	95 ± 1
	20	95 ± 5	9 ± 0,2	112 ± 15	70 ± 1	25 ± 0,5	95 ± 0
	30	101 ± 3	11 ± 0,2	112 ± 3	70 ± 4	27 ± 1	98 ± 3
	60	96 ± 2	13 ± 0,3	110 ± 3	70 ± 2	35 ± 2	105 ± 4
30	10	112 ± 7	10 ± 0,3	105 ± 4	72 ± 3	21 ± 0,1	93 ± 3
	20	95 ± 0,5	11 ± 0,1	123 ± 7	68 ± 1	26 ± 0,8	94 ± 0
	30	94 ± 3	14 ± 0,6	109 ± 0	71 ± 1	29 ± 0,05	100 ± 1
	60	89 ± 5	15 ± 0,3	109 ± 3	72 ± 5	36 ± 1	108 ± 4
45	10	107 ± 9	13 ± 0,5	102 ± 6	68 ± 1	27 ± 0,5	96 ± 1
	20	99 ± 3	16 ± 0,9	121 ± 13	65 ± 2	31 ± 1	96 ± 1
	30	93 ± 3	18 ± 1	118 ± 2	63 ± 0,4	34 ± 0,6	97 ± 0
	60	81 ± 3	23 ± 3	119 ± 2	64 ± 5	44 ± 1	108 ± 4
60	10	97 ± 1	18 ± 2	105 ± 8	62 ± 4	32 ± 2	94 ± 6
	20	73 ± 2	25 ± 0,1	103	45 ± 0	45 ± 1	91 ± 3
	30	70 ± 1	34 ± 0,1	131 ± 1	35 ± 3	51 ± 7	85 ± 4
	60	54 ± 2	41 ± 0,2	113 ± 2	28 ± 1	72 ± 1	100 ± 2

Résultats complémentaires : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets

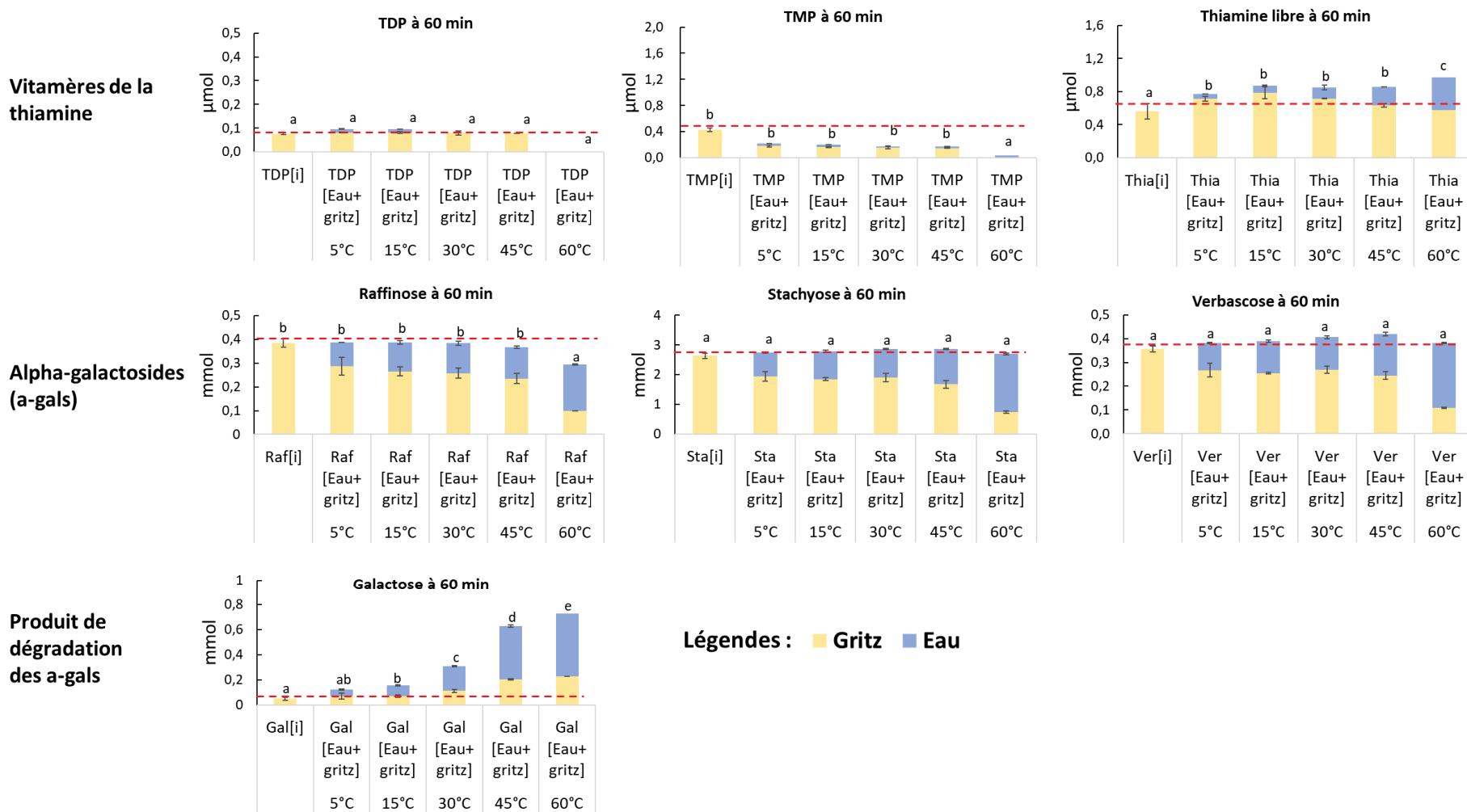


Fig 3. 14 : Nombre de moles des vitamères de la thiamine, des alpha-galactosides, du galactose dans les gritz et dans l'eau après 1h de trempage.

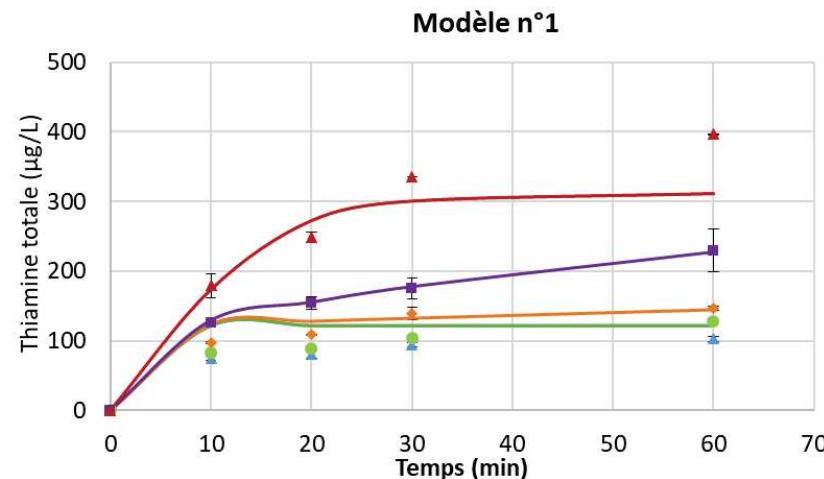
X[i] : correspond au nombre de mole initiale dans les gritz avec X représentant chaque molécule. La ligne rouge pointillée représente le niveau du nombre de moles initial dans les gritz lavés ($t=0$ min)

3.4. Modélisation de la diffusion de la thiamine totale et des alpha-galactosides totaux dans l'eau de trempage

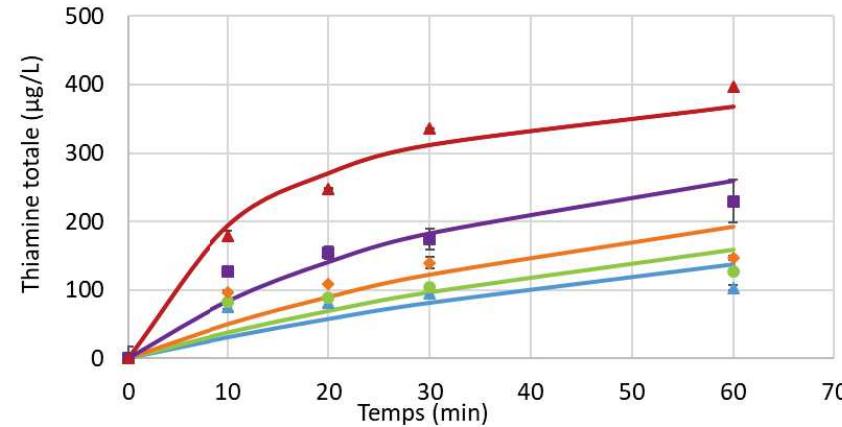
La figure 3.15 présente l'ajustement des deux modèles mathématiques aux données expérimentales de suivi des teneurs en thiamine totale et alpha-galactosides totaux dans l'eau de trempage. On peut observer que, contrairement au modèle n°2, le modèle n°1 représente bien le fait qu'au cours des 10 premières minutes de trempage, une solubilisation rapide des deux types de composés a lieu, depuis les gritz vers l'eau de trempage. Cette solubilisation semble être similaire pour toutes les températures de trempage sur cet intervalle de temps (caractérisée par la superposition des courbes), à l'exception de la thiamine totale à 60°C, pour laquelle une solubilisation plus importante a été observée.

Les sommes des carrés des écarts (SCE) entre les valeurs expérimentales et prédictes étaient faibles avec le modèle n°1 pour les trois alpha-galactosides par rapport au modèle n°2 (Tab 3.14). L'opposé a été observé pour le galactose avec des R^2 de 0,83 et 0,98 respectivement pour le modèle n°1 et le modèle n°2. Une variation croissante des coefficients de diffusion des alpha-galactosides et du galactose a été observée avec la montée en température. Entre 30°C et 60°C, les coefficients de diffusion variaient dans l'ordre suivant quelle que soit la température : Raffinose > Stachyose > Verbascose. Concernant la thiamine totale, les valeurs des SCEs entre les données expérimentales et prédictes étaient similaires pour les deux modèles (Tableau 3.15). Cependant, on peut observer qu'à 5°C et 15°C, les valeurs prédictes obtenues avec les deux modèles ne s'ajustaient pas correctement aux données expérimentales (Fig 3.15). De plus, certains coefficients de diffusion n'ont pas pu être déterminés à ces deux températures avec le Modèle n°1. Concernant la thiamine totale, comme pour les alpha-galactosides, une augmentation du coefficient de diffusion a été observée avec la montée en température.

Thiamine totale (Eau de trempage)



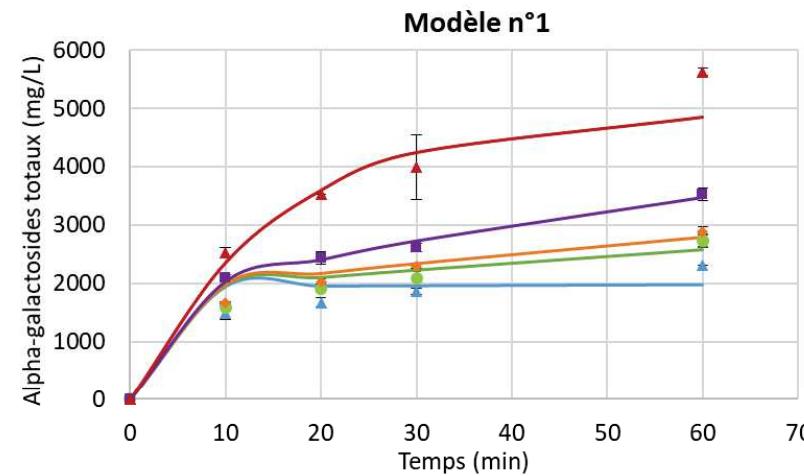
Modèle n°2



Légende :

- ▲ exp 5°C
- Mod 5°C
- exp 15°C
- Mod 15°C
- ◆ exp 30°C
- Mod 30°C
- exp 45°C
- Mod 45°C
- ▲ exp 60°C
- Mod 60°C

Alpha-galactosides totaux (Eau de trempage)



Modèle n°2

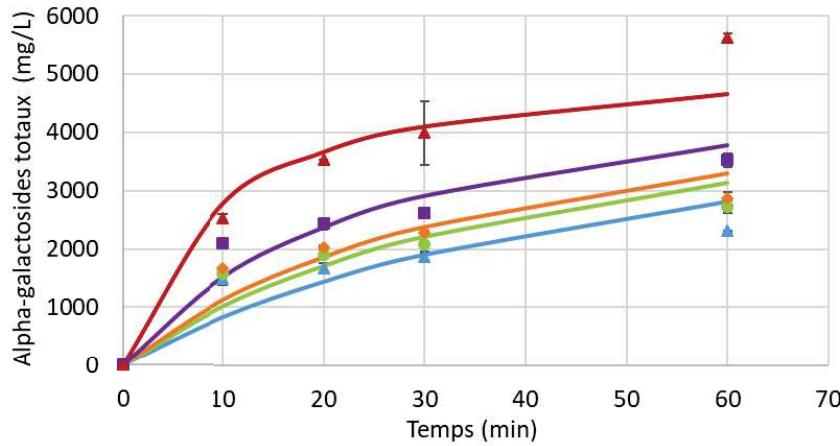


Fig 3. 15 : Représentation graphique des données expérimentales (points) vs prédictes (lignes) de l'évolution des teneurs en thiamine totale et alpha-galactosides totaux dans l'eau de trempage, en fonction de la durée et de la température de trempage.

Résultats complémentaires : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets

Tab 3. 14 : Coefficients de diffusion (Deff) et concentration à l'équilibre (Ce) des alpha-galactosides et du galactose

Alpha-galactosides et Galactose	Température (°C)	Modèle n°1			Modèle n°2				
		D _{eff} (10 ⁻¹⁰ .m ² min ⁻¹)	Ce (mg/l)	R ²	SCE*103	D _{eff} (10 ⁻¹² .m ² min ⁻¹)	Ce (mg/l)	R2	SCE*103
Total	5	0,3	4951 ± 188	0,95	3399 ± 0,3	0,5 ± 0,1	5402 ± 408	0,90	7044 ± 0,4
	15	6,9 ± 2,7				0,6 ± 0,2			
	30	9,5 ± 3,0				0,7 ± 0,2			
	45	20,3 ± 4,4				1,1 ± 0,3			
	60	97,3 ± 22,0				2,9 ± 1			
Verbascose	5	-	712 ± 129	0,96	53 ± 0	4,1 ± 1,1	742 ± 58	0,89	157 ± 0,1
	15	6,7 ± 0				5,1 ± 1,4			
	30	9,1 ± 0				5,8 ± 1,6			
	45	18,2 ± 0				8,0 ± 2,2			
	60	96,0 ± 0				23,0 ± 8,7			
Stachyose	5	2,3	3797 ± 164	0,95	2674 ± 0,3	0,5 ± 0,1	4541 ± 366	0,91	4237 ± 0,3
	15	7,3 ± 3,2				0,6 ± 0,2			
	30	9,8 ± 3,5				0,7 ± 0,2			
	45	21,9 ± 5,3				1,1 ± 0,3			
	60	103,3 ± 26,4				2,7 ± 0,9			
Raffinose	5	-	346 ± 93	0,94	22 ± 0	26,0 ± 6,5	295 ± 15	0,88	45 ± 0
	15	6,4 ± 0				38,5 ± 10,5			
	30	13,7 ± 0				58,8 ± 18,3			
	45	24,5 ± 0				195,7 ± 113,5			
	60	118,9 ± 0				372,1 ± 345,4			
Galactose	5	-	198 ± 178	0,83	79 ± 0	0,4 ± 0,1	558 ± 43	0,98	5 ± 0
	15	-				0,6 ± 0,1			
	30	9,4 ± 0				1,4 ± 0,3			
	45	86,2 ± 0				3,7 ± 0,7			
	60	279,3 ± 0				5,7 ± 1,2			

R²: Coefficient de détermination, SCE : somme des carrées des écarts

Résultats complémentaires : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets

Tab 3. 15 : Coefficients de diffusion (D_{eff}) et concentration à l'équilibre (C_e) de la thiamine totale

Thiamine	Modèle n°1				Modèle n°2				
	Température (°C)	D_{eff} ($10^{-10} \cdot m^2 min^{-1}$)	C_e (mg/l)	R^2	$SCE \cdot 10^3$	D_{eff} ($10^{-12} \cdot m^2 min^{-1}$)	C_e (mg/l)	R^2	$SCE \cdot 10^3$
Total	5	-	311 ± 178	0,93	39 ± 0	$2,5 \pm 0,7$	448 ± 40	0,92	37 ± 0
	15	-				$3,1 \pm 0,8$			
	30	$3,5 \pm 0$				$4,2 \pm 1,1$			
	45	$23,0 \pm 0$				$7,7 \pm 2,1$			
	60	$188,9 \pm 0$				$25,5 \pm 9,2$			

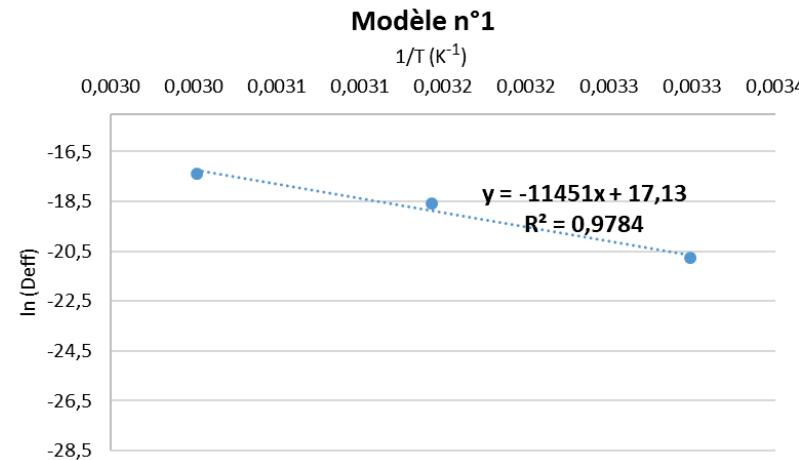
R^2 : Coefficient de détermination, SCE : somme des carrées des écarts

3.5. Prédiction des teneurs en alpha-galactosides totaux et thiamine totale : utilisation du modèle de dépendance de D_{eff} à la température

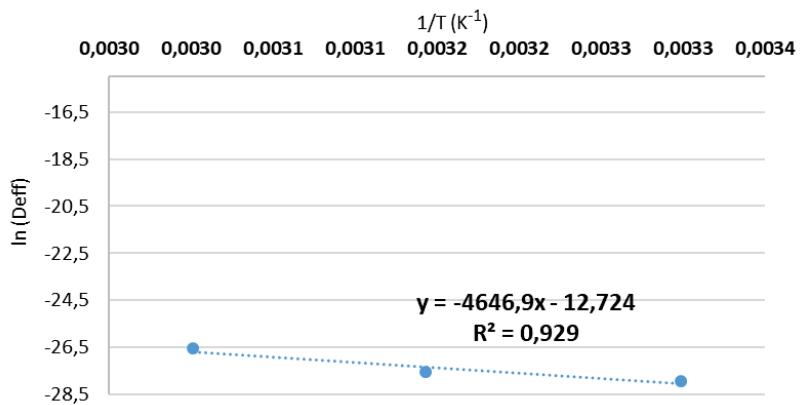
La linéarisation du coefficient de diffusion de la thiamine totale et des alpha-galactosides totaux par rapport à la température a été réalisée entre 30°C et 60°C (Fig 3.16) et utilisée pour prédire la diffusion de la thiamine totale et des alpha-galactosides à des températures non comprises dans notre plan expérimental.

Les prédictions réalisées par itération, en augmentant la température de 1°C, ont donné des coefficients de diffusion des alpha-galactosides totaux qui variaient de $0,8 \cdot 10^{-9}$ à $8,3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2\text{min}^{-1}$ et $0,7 \cdot 10^{-12}$ à $2,6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2\text{min}^{-1}$ pour le modèle n°1 et le modèle n°2, respectivement. Pour la thiamine totale, la variation du coefficient de diffusion était de $3,3 \cdot 10^{-10}$ à $1,8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2\text{min}^{-1}$ et $0,4 \cdot 10^{-11}$ à $2,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2\text{min}^{-1}$ respectivement avec le modèle n°1 et le modèle n°2. Les proportions de diffusion des alpha-galactosides totaux étaient plus importante que celles de la thiamine totale, quel que soit le couple « temps-température ». Les proportions de diffusions obtenues avec les prédictions à certaines températures (30°C, 40°C, 50°C, 60°C) sont présentées à la figure 3.17. A l'équilibre, la diffusion des alpha-galactosides totaux était d'environ 20% plus élevée par rapport à celle de la thiamine.

Alpha-galactosides totaux (Eau de trempage)



Modèle n°2



Thiamine totale (Eau de trempage)

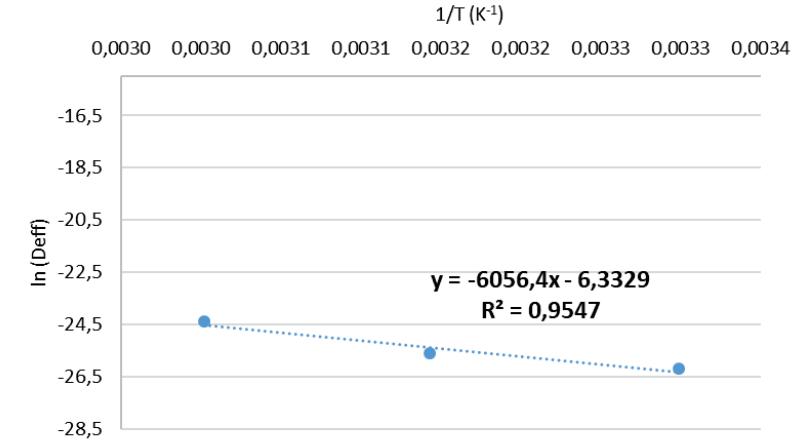
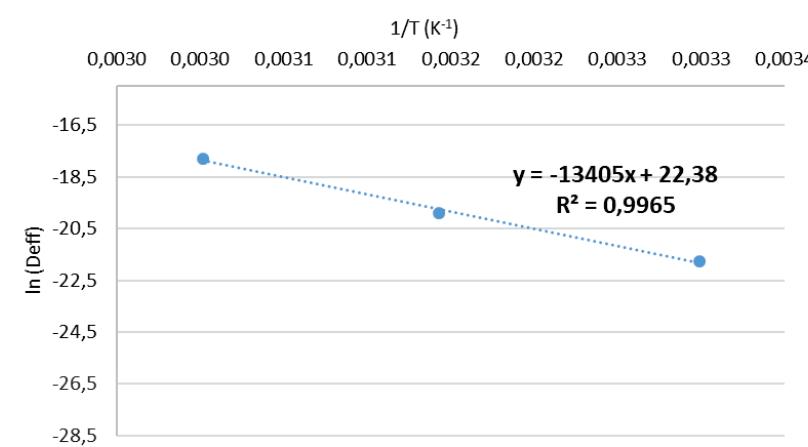


Fig 3. 16 : Courbes d'Arrhenius de l'effet de la température de trempage sur la diffusivité effective (D_{eff}) de la thiamine totale et des alpha-galactosides totaux. T : Température

Résultats complémentaires : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets

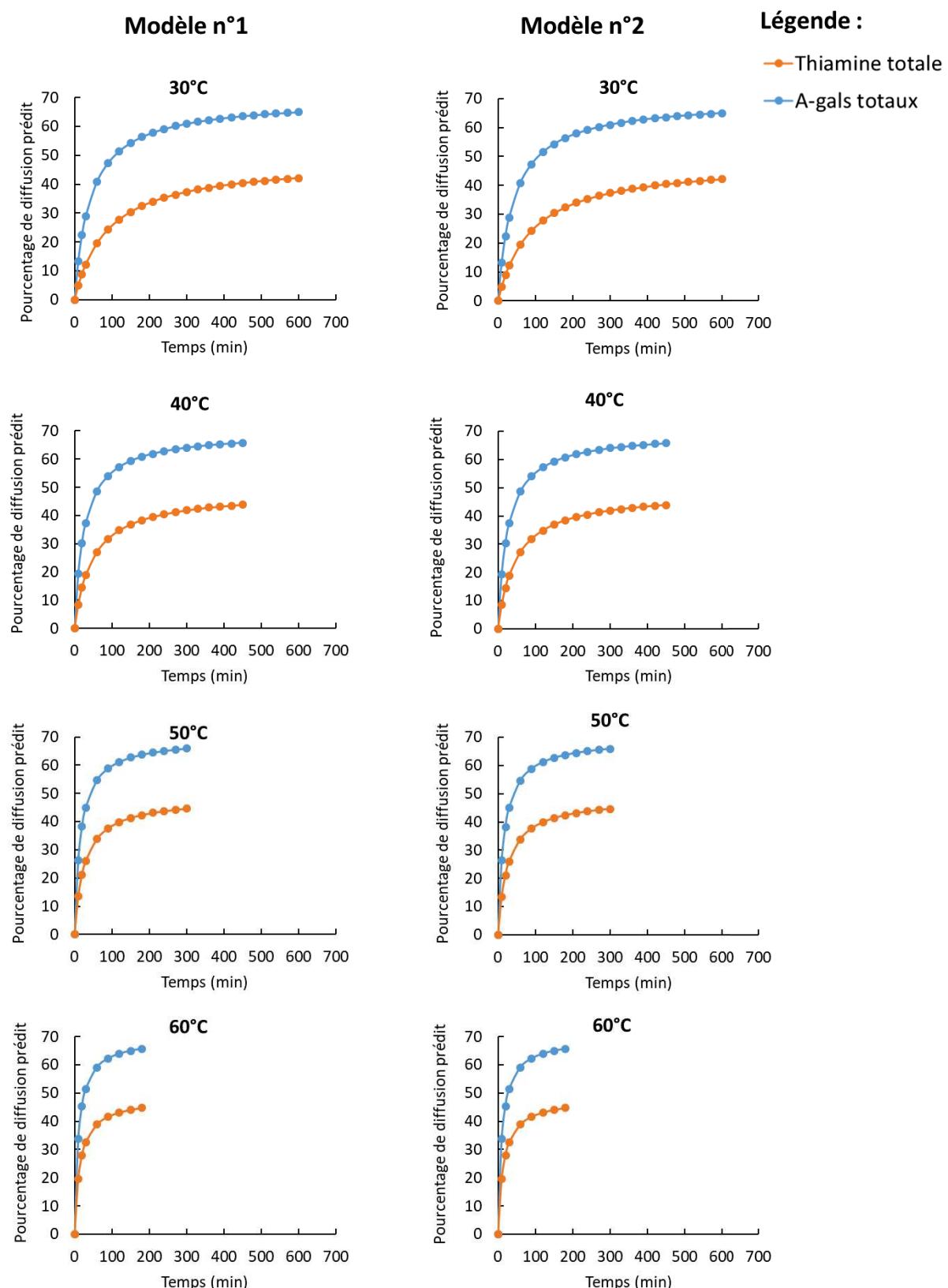


Fig 3. 17 : Courbes de diffusion de la thiamine totale et des alpha-galactosides (%), construites à partir des données prédictes, pour des durées de trempages plus longues.

4. Discussion

Les travaux présentés dans cette partie ont permis de comprendre le comportement de la thiamine et des alpha-galactosides au cours de l'opération de trempage des gritz de niébé, à travers la réalisation de bilans molaires pour réaliser le suivi de ces composés dans l'eau de trempage ainsi que dans les gritz trempés, associée à l'utilisation de modèles mathématiques empiriques créés pour expliquer des phénomènes d'extraction/diffusion.

Le trempage est une opération au cours de laquelle se produit la migration des composés solubles dans l'eau, mais également un phénomène d'absorption d'eau. Les gritz de niébé, qui constituent une matrice « désintégrée » en raison du décorticage et du concassage des graines, ont montré au cours de l'opération de trempage une aptitude d'absorption d'eau similaire à celle des graines entières. La forte capacité d'absorption d'eau (plus de 8 fois du volume initial) observée après l'étape de lavage des gritz pourrait être liée à l'absence des enveloppes, éliminées lors du décorticage. Les valeurs de capacité d'absorption d'eau à l'équilibre obtenues dans notre étude sont proches des résultats rapportés par Coffigniez *et al.*, (2018) et par Kaptso *et al.*, (2008), qui ont obtenu des valeurs de 1,3–1,5 g eau/g, et 1,4–1,5 g eau/g, pour des variétés de niébé cultivées au Bénin et au Cameroun, respectivement.

La diminution des teneurs des formes phosphatées de la thiamine pourrait s'expliquer par des inter-conversions entre vitamères, car une augmentation de la teneur thiamine libre a été observée aux différentes températures (Fig 3.14). Concernant l'évolution de la thiamine totale au cours du trempage des gritz de niébé, les résultats obtenus n'ont pas montré de variations importantes entre la valeur initiale mesurée dans les gritz lavés ($t=0$ min) et la quantité totale mesurée après trempage (*i.e.* somme des nombres de mole dans l'eau de trempage et dans les gritz trempés), quelle que soit la température (Tableau 3.13). Ceci laisse suggérer qu'au cours du trempage des gritz de niébé, la perte de vitamine B1 dans les gritz serait due essentiellement à la diffusion de cette vitamine dans l'eau de trempage. En effet, les températures choisies dans cette étude étaient suffisamment basses pour éviter la dégradation thermique de la thiamine. Une étude réalisée sur quelques variétés de la graine de niébé a montré que le trempage à température ambiante entraînait une réduction de la thiamine variant entre 3-13% de la teneur initiale tandis que la cuisson par ébullition a causé une perte moyenne à 57% (Edijala, 1980a). Une autre étude du même auteur a montré que l'utilisation d'agent alcalin au cours de la cuisson à l'eau entraînait une perte importante de la

thiamine comparativement à la cuisson à l'eau simple (Edijala, 1980b). Ces deux dernières études ont également qu'au cours de l'opération de cuisson à l'eau, les pertes de thiamine n'étaient pas seulement liées à la diffusion mais aussi à la dégradation (thermique et/ou due à l'agent alcalin). Dans d'autres légumineuses (haricot, pois, soja), Mašková et al., (1996) ont montré durant la cuisson classique et à haute pression, le pourcentage de rétention de la thiamine était compris entre 40 à 80% avec une faible rétention pour le second mode de cuisson. Les résultats obtenus dans le cadre de notre étude sont originaux, car aucune étude n'avait jusqu'à présent été réalisée pour suivre la diffusion des vitamères de thiamine (thiamine libre et formes phosphatées) au cours du trempage de légumineuses.

Concernant le bilan molaire des alpha-galactosides dans l'eau de trempage et dans les gritz, aucune différence significative n'a été observée pour le verbascose et le stachyose entre la somme des teneurs finales (dans les deux milieux), comparativement aux teneurs initiales mesurées pour les gritz lavés. Tandis que pour le raffinose, une réduction d'environ 4% et 23% a été observée par rapport aux gritz lavés ($t=0$ min), après 1h de trempage à 45°C et 60°C, respectivement (Fig 3.14). Ces différences de comportement entre les trois alpha-galactosides pourraient être liées à l'activité des alpha-galactosidases qui présentent plus d'affinité pour le raffinose comparativement aux deux autres molécules. Coffigniez et al., (2018) ont observé des résultats similaires lors du trempage de graines de niébé entières. En effet, les alpha-galactosidases hydrolysent plus rapidement les oligosaccharides de faible poids moléculaire que ceux de poids moléculaire plus élevé, comme le stachyose et le verbascose. De plus, l'intervalle de température où l'activité des alpha-galactosidases est maximale au niveau des graines entières de niébé est de 40 à 55°C avec une durée d'action variant entre 5 min à 1h (Coffigniez et al., 2018b). L'augmentation de la teneur en galactose, observée au cours du trempage des gritz, pourrait être causée par la dégradation du raffinose.

Les modèles empiriques utilisés dans le cadre de notre étude ont été choisis, car ils permettent d'expliquer des phénomènes d'extraction/de diffusion (Syamsiah and Marseno, 2016) et (Perez et al., 2011). Les gritz de niébé ayant de petites tailles (et sans enveloppes) comparativement au graines de niébé, ces modèles étaient adéquats dans le cadre de notre étude. Leur ajustement à nos données expérimentales s'est avéré variable en fonction des composés. Par exemple, en considérant chacun des alpha-galactosides ainsi que leur total, les sommes des carrés des écarts, obtenues à l'aide du modèle n°1 étaient faibles par rapport à

celles générées par le modèle n°2. Les prédictions réalisées à l'aide de ces modèles n'ont pas encore pu être validées, par manque de temps, mais cette validation sera effectuée prochainement, en vue de publier ces résultats.

Au Bénin, lors du procédé de production des beignets Ata, l'étape de trempage des gritz de niébé dure entre 9 à 38 min, et se déroule à température ambiante (Akissoé *et al.*, 2021). Sur la base des données prédites (Fig 3.17) et en fixant pour objectif une diffusion dans l'eau d'environ 50% et 30% de la teneur initiale en alpha-galactosides totaux et en thiamine totale, respectivement, les conditions de trempage ci-après pourraient être appliquées :

- **Scénario 1 : 30°C pendant 120 min** avec une diffusion de 2612 mg/100 g de gritz (bs) et de 0,17 mg/100 de gritz (bs) respectivement pour les alpha-galactosides totaux et pour la thiamine totale.
- **Scénario 2 : 50°C pendant 60 min** avec une diffusion de 2775 mg/100 g de gritz (bs) et de 0,20 mg/100 de gritz (bs) respectivement pour les alpha-galactosides totaux et pour la thiamine totale.
- **Scénario 3 : 60°C pendant 30 min** avec une diffusion de 2608 mg/100 g de gritz (bs) et de 0,20 mg/100 de gritz (bs) respectivement pour les alpha-galactosides totaux et pour la thiamine totale.

Il est important de noter que chacun des trois scénarios proposés pourrait présenter des contraintes pour les productrices. Le scénario 1 nécessite un temps de trempage très long (ce qui pourrait générer un début de fermentation, et donc des risques sanitaires). Le scénario 2 implique à la fois une longue durée de trempage, une source de chaleur pour maintenir une température de 50°C, ainsi que des moyens techniques pour suivre et réguler la température de trempage. Le scénario 3 bien qu'étant dans l'intervalle du temps de trempage appliqués sur le terrain, nécessite également une source de chaleur et le contrôle de la température.

Les conditions de décorticage et de lavage réalisées dans cette étude, combinées aux scénarios de trempage proposés, pourraient permettre au niveau des gritz trempés une réduction de 43-45% de la teneur initiale des alpha-galactosides de la matière première qui était de 6005 mg/100 g (bs). Dans l'étude précédente concernant l'influence des procédés traditionnels des beignets sur les composés (Akissoé *et al.*, 2021), les pratiques des productrices au cours du bilan matière réalisé durant le procédé Ata avaient permis d'observer

Résultats complémentaires : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets

une teneur en alpha-galactosides totaux de 3688 mg/100 g (bs) dans les gritz trempés avec une teneur initiale dans la matière première de 5277 mg/100 g (bs), soit une réduction de 30%. Ces données suggèrent donc que l'application des scénarios proposés pourrait contribuer à une perte supplémentaire d'environ 15% au niveau des gritz trempés optimisés comparativement aux échantillons collectés auprès des productrices.

Afin de réduire davantage les teneurs en alpha-galactosides, d'autres techniques pourraient être envisagées. La réduction des alpha-galactosides au cours de la germination des graines entières de niébé a été montrée dans les travaux réalisés par Coffigniez, (2018). Les résultats de ces essais peuvent être utiles dans le développement d'une technologie améliorée de production des beignets de niébé en partant des graines germées. En ce qui concerne les caractéristiques organoleptiques des beignets de niébé germé, Nnanna et al., (1990) ont montré que la germination a amélioré de manière significative la couleur de la croûte des beignets de niébé. Mais les aspects concernant la tendreté et le goût étaient légèrement modifiés. Il serait donc nécessaire d'étudier l'acceptabilité globale des beignets de graines germées auprès de la population béninoise.

Apports et limites de l'étude

(+) Nos résultats ont montré un bon ajustement des équations empiriques choisies aux données expérimentales.

(+) L'étude partielle du comportement des formes phosphatées de la thiamine au cours du trempage des légumineuses, n'a pas été effectuée dans la littérature.

(-) Les modèles utilisés dans cette étude nous ont permis d'évaluer une tendance de diffusion des alpha-galactosides totaux et de la thiamine mais présentent des limites, car ils ne permettent de représenter plus précisément le système étudié. En perspective, on pourrait s'intéresser à l'étude des phénomène d'inter-conversion de vitamères phosphatés de la thiamine en utilisant une approche mécaniste.

5. Conclusion

Dans cette partie, l'opération de trempage des gritz de niébé, utilisés pour la production des beignets, a été étudiée en vue de comprendre les phénomènes entraînant des pertes en thiamine (vitamine B1) et en alpha-galactosides (facteurs de flatulence). Les pertes en thiamine et alpha-galactosides au cours du trempage des gritz étaient majoritairement dues à un phénomène diffusif, mais avec des dynamiques différentes en fonction des molécules, car la diffusion des alpha-galactosides dans l'eau était plus importante que celle de la thiamine. Sur la base de prédictions réalisées à l'aide de modèles empiriques, des recommandations de nouvelles conditions de trempage ont été faites, en proposant des couples temps/températures qui pourraient permettre d'optimiser le procédé de trempage, en réduisant les teneurs en alpha-galactosides tout en limitant les pertes en thiamine.

3.5. Réduction de l'absorption d'huile durant de la friture des beignets de niébé « Ata » et « Ata-doco »et devenir de la thiamine au cours de cette étape

1. Introduction

Les chapitres précédents ont montré que les plats à base de niébé (*Vigna unguiculata*) peuvent représenter une source importante de protéines, d'énergie, de fibres, et de micronutriments pour les populations béninoises. Au Bénin, cette légumineuse est transformée sous des formes variées, et les beignets de niébé font partie des plats traditionnels très appréciés et fréquemment consommés par les populations, rurale comme urbaine. Parmi les différents types de beignets existants, on distingue les beignets Ata (AT, préparés à partir de graines décortiquées et trempées, subissant une mouture humide) et Ata-doco (AD, préparés à partir de graines entières ou partiellement décortiquées et moulues par voie sèche). D'après l'enquête de fréquence de consommation des plats traditionnels à base de niébé réalisée dans le sud du Bénin (présentée dans les deux premiers sous-chapitres des résultats), les beignets AT étaient davantage consommés par la population en zone urbaine comparativement aux zones rurales (61% vs. 22%), tandis que pour les beignets AD, l'opposé a été observé (16% vs. 30%).

Au cours des procédés de transformation du niébé, certaines opérations unitaires peuvent s'avérer sévères, réduisant ainsi la valeur nutritionnelle des plats préparés. L'étape de friture, caractérisée par une cuisson à température élevée pendant une courte durée, peut entraîner des phénomènes tels que le transfert de chaleur, la déshydratation partielle du produit et l'absorption d'huile (Oke *et al.*, 2018; Vitrac and Touffet, 2019). De nos jours, les consommateurs sont de plus en plus soucieux d'avoir une alimentation saine, notamment en limitant leur consommation d'aliments trop riches en lipides et en augmentant leurs apports en vitamines et minéraux (Oke *et al.*, 2018). De nombreuses études ont cherché à décrire les mécanismes se déroulant au cours de la friture, et pouvant avoir un impact sur la qualité nutritionnelle des produits, tels que l'absorption d'huile, la dégradation d'acides aminés, et la destruction de vitamines (Fillion and Henry, 1998; Oke *et al.*, 2018; Asokapandian *et al.*, 2020). Plusieurs études se sont intéressées au procédé de fabrication des beignets de niébé. L'impact des méthodes de décorticage et des variétés (blanche, tachetée et marron) sur les propriétés fonctionnelles des farines de niébé, utilisées pour la production de beignets, a été mis en

évidence par Amonsou *et al.*, (2009). Ils ont montré que les propriétés fonctionnelles de la farine de niébé étaient plus dépendantes de la variété que de la méthode de décorticage. Le niébé tacheté présentait une meilleure capacité de formation de mousse comparativement aux autres variétés. Le niébé blanc a montré une forte capacité d'absorption d'eau souhaitable. Le niébé marron a présenté des valeurs intermédiaires pour les propriétés fonctionnelles mesurées. Kethireddipalli *et al.*, (2002a) ont étudié l'influence des types de moutures (par voie sèche ou humide) sur les propriétés fonctionnelles de la pâte à frire ainsi que des beignets. Sur base des résultats de microstructure et des différences des propriétés fonctionnelles observées, cette étude a montré que les techniques de broyage par voie humide et par voie sèche génèrent des pâtes aux caractéristiques structurelles et fonctionnelles très différentes. Les pâtes obtenues par mouture humide des cotylédons trempés présentaient une capacité de formation de mousse et d'absorption d'eau ce qui favorisait la fabrication de beignets non-durs contrairement aux pâtes obtenues par hydratation de la farine de niébé générée par mouture sèche des graines. Vanchina *et al.*, (2006) ont indiqué que le type de mouture et la taille des particules sont des facteurs pouvant influencer la qualité et l'acceptabilité des beignets de niébé. Tout comme l'étude précédente, ils ont montré que la mouture humide permettait des beignets de qualités organoleptiques désirables. Ils ont également souligné que la taille des particules des pâtes issues de l'hydratations des farines de niébé peuvent être contrôlées (65% de particules comprises entre 0,18-0,425 mm et 35% variant entre 0,425-1 mm) pour fabriquer des beignets de qualités similaires à celles des pâtes obtenues par mouture humide.

Des travaux préliminaires réalisés par notre équipe sur des échantillons de beignets Ata et Ata-doco collectés auprès de productrices locales dans le Sud du Benin, ont montré une plus forte absorption d'huile pour les beignets Ata (28 g/100 g base humide), comparativement aux beignets Ata-doco (15 g/100 g base humide). Cependant, la très forte variabilité de la composition nutritionnelle de ces produits, liée à la variabilité des pratiques des transformatrices, n'a pas permis d'élucider l'impact réel de l'étape de friture sur les micronutriments d'intérêts (Akissoé *et al.*, 2021). C'est pourquoi, en nous basant sur les paramètres déjà étudiés dans la littérature, à savoir le type de mouture (humide vs sèche) et la granulométrie de la pâte, nous avons conçu un plan d'expérience et réalisé des expérimentations, dans l'objectif d'identifier des conditions permettant de réduire les teneurs

en lipides des beignets, tout en limitant les pertes en thiamine (vitamine B1, très sensible à la chaleur). Les facteurs suivants ont été intégrés à ce plan d'expérience : la granulométrie de la pâte, la masse des pâtons (pâte avant friture), la durée et la température de friture. Le plan d'expérience a été exécuté pour les deux types de beignets (Ata et Ata-doco) afin de comparer la mouture humide à celle par voie sèche, et l'influence des différents facteurs sur trois types d'échantillons (beignets entiers, mie et croûte) a été mesurée, en termes de teneur en matière sèche, teneur en lipides, teneurs en thiamine, mais également en termes de caractéristiques physiques des beignets (couleur, épaisseur de la croûte). Cette étude a été pensée comme la première étape d'un travail d'optimisation, qui aura vocation à être poursuivi à l'avenir.

2. Matériel et méthodes

2.1. Plan d'expérience

La construction du plan a été effectuée à l'aide du logiciel Statgraphics (Version 18.1.12). Deux plans de criblages ont été réalisés respectivement pour AT et pour AD. Pour tous les facteurs expérimentaux à l'exception de la granulométrie des pâtes, des points au centre ont été ajoutés dans la construction du plan. Au total, 16 essais randomisés avec 4 points centraux ont été effectués pour chacun des deux plans (Tableau 3.16).

Les niveaux hauts et bas du facteur « masse du pâton » ont été choisis en fonction des observations et mesures ayant été réalisées sur le terrain auprès de productrices de beignets à Cotonou (données non publiées du projet ICOWPEA). Concernant la température et la durée de friture, les niveaux ont été choisis sur la base de l'étude présentée dans l'article Akissoé et al., (2021). La granulométrie de pâte est un facteur additionnel dont les niveaux ont été définis après plusieurs essais de broyage au laboratoire en utilisant comme référence la distribution des tailles de particules des échantillons de pâte collectés sur le terrain.

Tab 3. 16 : Différents essais du plan d'expérience Ata et Ata-doco

Produit	Masse pâton (g)	Granulométrie de la pâte	Température (°C)	Durée (min)
AT ou AD	22	Grossière	150	7
AT ou AD	36	Grossière	150	3
AT ou AD	22	Grossière	180	3
AT ou AD	36	Grossière	180	7
AT ou AD	50	Fine	180	7
AT ou AD	36	Fine	165	5
AT ou AD	36	Fine	150	7
AT ou AD	50	Fine	150	3
AT ou AD	36	Fine	180	3
AT ou AD	50	Grossière	150	7
AT ou AD	22	Fine	180	7
AT ou AD	36	Grossière	165	5
AT ou AD	50	Grossière	180	3
AT ou AD	22	Fine	150	3

AT : Ata ; AD : Ata-doco.

2.2. Préparation des pâtes de Ata et Ata-doco

La variété blanche de niébé nommée Atchawé-Tola a été utilisée. Pour la préparation de la pâte des beignets AT, les graines ont été préalablement décortiquées par concassage puis lavées afin d'éliminer les enveloppes et farines fines. Les gritz lavés ont été ensuite utilisés pour la mouture par voie humide. Pour la préparation des beignets AD, les graines sèches ont été moulues directement par voie sèche. Les opérations de concassage et mouture ont été réalisées à l'aide d'un moulin à meules commercial (Ref. B07DXSBSNC). Pour la mouture, deux distances de l'axe du moulin (D) ont été appliquées afin d'obtenir deux pâtes de granulométrie différente, fine (D=19 mm) et grossière (D=18,5 mm), par type de beignet (Tab 3.16).

Avant la friture, une quantité d'environ 400 g de pâte a été battue à l'aide d'un robot pâtissier commercial (Moulinex, QA405HB1, Chine) pendant 15 minutes à une vitesse 4. La teneur en matière sèche finale (TMS) des pâtes a été ajustée, de manière à correspondre aux valeurs moyennes observées sur le terrain. Ainsi, les TMS pour AT et AD étaient respectivement 30% et 40%. La quantité d'eau nécessaire pour atteindre ces TMS a été déterminée suivant la formule ci-après :

$$Wa = \frac{Qp (TMSi - TMSf)}{TMSf}$$

Avec :

Wa la masse d'eau nécessaire pour atteindre la teneur en eau visée,

Q_p la quantité de pâte (Ata) ou de farine (Ata-doco) prélevée (g),

TMS_i teneur en matière sèche initiale en %

TMS_f teneur en matière sèche finale en %

Pour s'assurer de la justesse des ajustements effectués, des mesures de teneur en matière sèche ont été effectuées sur les pâtes.

2.3. Mesure de la granulométrie des pâtes

La détermination de la granulométrie des pâtes a été effectuée à l'aide d'un granulomètre laser Mastersizer 3000 (Malvern) doté d'une cellule de mesure par voie humide HydroMV. Un triplicata de mesure a été effectué pour chaque pâte.

2.4. Friture

Les essais de friture ont été réalisés suivant les plans d'expérience définis pour AT et AD. Les échantillons ont été frits dans une friteuse commerciale (SEB, France) contenant 2,5 L d'huile. Après chaque essai de friture, le niveau d'huile était vérifié et complété au volume maximal. Tous les essais ont été réalisés en utilisant une huile de palme raffinée de la marque Gino, habituellement utilisée par les productrices locales. Environ 6 pâtons de masses connues ont été placés dans le bain d'huile lors de chaque essai de friture.

2.5. Mesure de la température du bain d'huile et au cœur du produit

Pendant la cuisson, des mesures de températures ont été effectuées. Pour cela, une sonde a été placée dans le bain d'huile de manière à suivre l'évolution de la température de l'huile et une seconde sonde a été placée au cœur d'un beignet permettant de visualiser les montées en températures au cœur du produit frit. Ces mesures ont été effectuées toutes les 30 secondes.

2.6. Analyses des échantillons

Matière sèche. Les échantillons ont été séchés dans une étuve à 105°C pendant une nuit de sorte à obtenir une déshydratation complète (AOAC, 2006).

Colorimétrie. Après cuisson, des mesures colorimétriques ont été réalisées sur la croûte des beignets à l'aide d'un colorimètre Minolta CR 400. Celui-ci donne accès à 3 variables : « L » qui représente la luminescence, « a » la variation de couleur du vert au rouge, et « b » la variation

de couleur entre le jaune et le bleu. Dix mesures ont été effectuées sur la croûte de chaque beignet, de manière à obtenir des valeurs représentatives de l'ensemble.

Lipides. Les échantillons ont été soumis à une hydrolyse à l'acide chlorhydrique 37% (100°C pendant 30 min). La phase lipidique a ensuite été extraite avec de d'éther de pétrole (Soxtec LIP-02, FOSS, Danemark). Le solvant a été ensuite évaporé afin de déterminer la teneur en lipides par gravimétrie.

Thiamine. La thiamine libre ainsi que les formes phosphatées ont été déterminées par UPLC avec une détection en fluorescence suivant la méthode décrite par Schmidt et al., (2017) avec quelques modifications. Le dosage consiste en une hydrolyse acide suivie d'une oxydation de la thiamine en thiochrome avant analyse par chromatographie liquide à ultra-haute performance (UPLC) avec détection en fluorescence. Pour les échantillons de mie et les beignets entiers, environ 1 g d'échantillon a été placé dans un tube ainsi que 40 mL de HCL 0,1 mol. L⁻¹ afin de réaliser une hydrolyse acide à 100°C pendant 60 min. Pour les échantillons de croûte, 2 g ont été pesés. A la suite de l'extraction, les échantillons ont été centrifugés à 8500 rpm pendant 15 min à 4°C. Ensuite, 2,5 mL du surnageant ont été repris puis 1,5 mL d'une solution de potassium hexacyanoferrate III (0,04%, v/v) ont été ajoutés pour réaliser l'oxydation de la thiamine en thiochrome. L'arrêt de la réaction a été réalisé au bout de 2 minutes par ajout d'acide ortho-phosphorique 85%. Après filtration des extraits oxydés (filtre 0,2 µm), les échantillons ont été analysés par UPLC avec une phase mobile composée d'acétate de sodium 15 mmol. L⁻¹ et de méthanol. La phase stationnaire est faite de silice (Colonne HSS T3 100 mm x 2,1 mm i.d., 1,7 µm). La détection a été réalisée en fluorescence avec excitation à 365 nm et émission à 435 nm. Une gamme avec des solutions standards de thiamine hydrochloride, thiamine diphosphate (TDP) et thiamine monophosphate (TMP) a été préparée afin de quantifier les différents vitamères dans les échantillons. Le temps de rétention de la TDP est aux alentours de 1,7 min, celui de la TMP de 1,9 min et celui de la Thiamine de 2,2 min.

2.7. Analyses statistiques

L'ensemble des résultats issus des plans d'expérience a été analysé à l'aide du logiciel Statgraphics (Version 18.1.12) qui permet d'évaluer la significativité des effets des facteurs et

de représenter graphiquement les effets des facteurs et les interactions entre les paramètres. Le traitement des données est réalisé à l'aide d'ANOVAs à plusieurs facteurs, et nous avons considéré le paramètre statistiquement significatif dès lors que la *P-value* est inférieure à 0,05.

3. Résultats

3.1. Taille des particules et caractéristiques physico-chimiques des pâtes des beignets AT et AD

Des profils granulométriques similaires ont été observés au niveau des pâtes fine et grossière pour chaque type de beignet (Fig 3.18). Au niveau des deux pâtes de AT, une distribution trimodale a été observée quelle que soit la granulométrie. Le premier pic avait des tailles de particules variant entre 0,5 à 1,5 µm, le second pic correspondait aux particules dont la taille était comprise entre 6 à 50 µm et le dernier pic était caractérisé par une large gamme de particules dont les valeurs variaient de 50 µm jusqu'au-delà de 1000 µm. Ces trois pics ont été également observés au niveau des pâtes des beignets AD avec un autre pic supplémentaire qui s'étendait sur 6 µm à 50 µm. Pour chacune des pâtes, le pourcentage volumique des particules comprises entre 50 µm jusqu'au-delà de 1000 µm était majoritaire par rapport aux autres tailles de particules.

Résultats complémentaires : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets

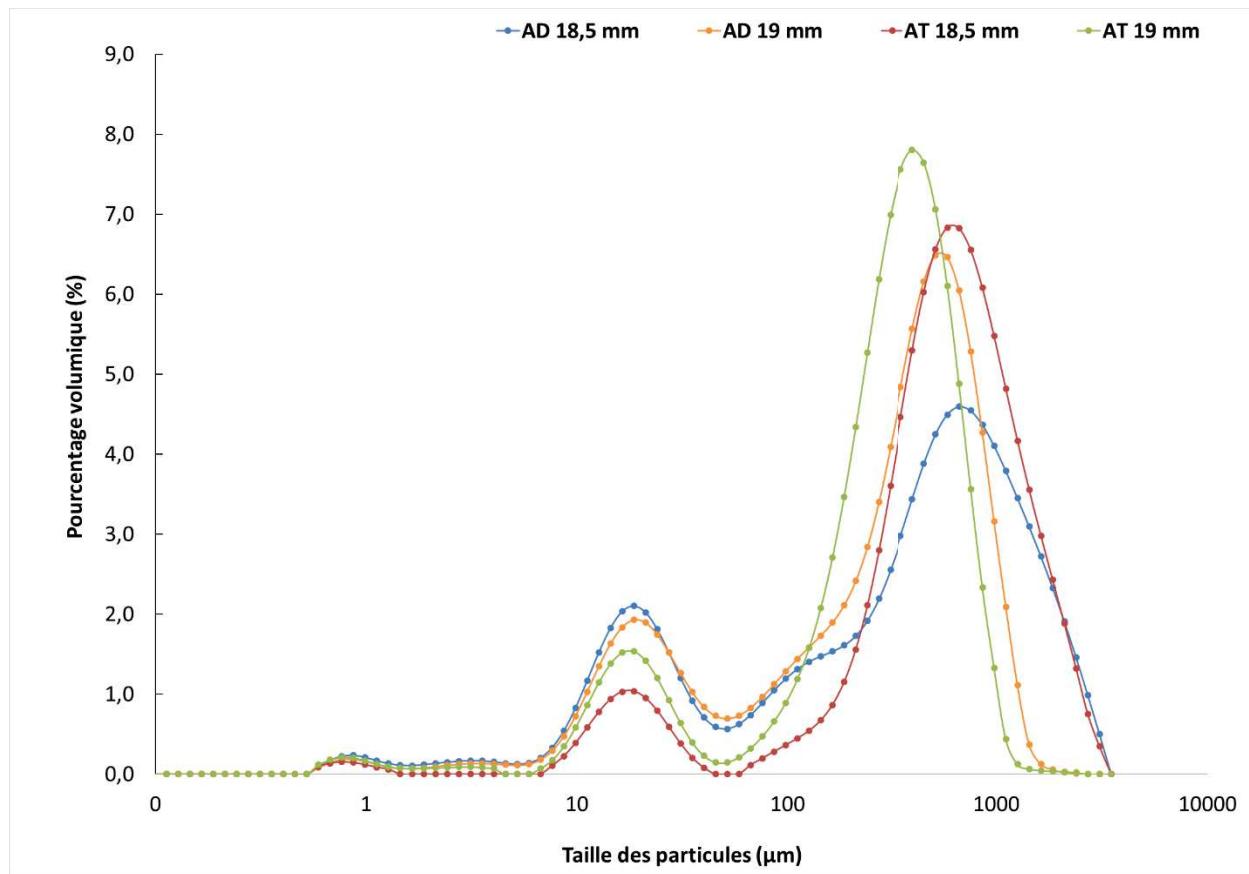


Fig 3. 18 : Distribution granulométrique des particules de pâtes AT et AD pour les deux réglages de broyage

En moyenne, la taille des particules des échantillons ayant subi le broyage grossier avoisinait le double de la taille des particules des échantillons broyés finement (Tab 3. 17).

Tab 3. 17 : Taille des particules caractéristiques des différents échantillons.

	AD fin	AD grossier	AT fin	AT grossier
Dx(50)	$371,2 \pm 8,5$	$461,7 \pm 8,2$	$345,7 \pm 10,6$	$632,6 \pm 14,5$
Dx(90)	$890,2 \pm 42,0$	$1623,3 \pm 43,7$	$717,6 \pm 24,8$	$1616,8 \pm 101$
D[4 ;3]	$413,6 \pm 19,0$	$648,4 \pm 9,0$	$372,4 \pm 17,2$	$774,7 \pm 32,2$

D x(50) reflète la médiane : 50% des particules de l'échantillon ont une taille inférieure à la valeur en µm ; Dx(90) : 90% des particules ont une taille inférieure (en µm) à la valeur donnée ; D[4 ;3] représente la valeur moyenne volumique : elle reflète la taille des particules qui constituent la majeure partie du volume de l'échantillon.

Au niveau des pâtes utilisées pour la préparation des beignets AD, la granulométrie de la pâte avait une influence sur la capacité moussante au cours du battage. Les pâtes avec des tailles

Résultats complémentaires : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets

de particules plus grossières présentaient un aspect mousseux et léger, du fait d'une plus forte incorporation d'air (Fig 3.19).



Granulométrie grossière



Granulométrie fine

Fig 3. 19 : Aspect des pâtes des beignets AD après 15 min de battage en fonction de leur granulométrie

Après l'ajustement de teneur en matière sèche des pâtes, les valeurs obtenues étaient comprises entre 39,8 et 40,8 % pour toutes les pâtes du plan d'expérience des beignets AD et entre 28,4 % et 32,4 % pour les pâtes de AT. Le tableau 3.18 présente les valeurs moyennes en fonction de la granulométrie des pâtes.

Tab 3. 18 : Teneur en eau des pâtes de AT et AD

Beignets	Pâtes	Teneur en matière sèche (%)	
		Valeur attendue	Valeurs obtenues après ajustement
Ata-doco	AD fin	40	$40,3 \pm 0,2$
	AD grossier		$40,3 \pm 0,3$
Ata	AT fin	30	$30,4 \pm 0,9$
	AT grossier		$30,3 \pm 1,0$

3.2. Température du bain d'huile et température au cœur des beignets

Résultats complémentaires : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets

Les données sur l'évolution de la température du bain d'huile et au cœur des beignets AT et AD sont respectivement présentées en figures 3.20 et 3.21. Pour les beignets AT, la température du bain d'huile entre le début et la fin de friture variaient en moyenne entre 129-161°C, 152-196°C et 163-203°C respectivement pour les essais prévus à 150°C, 165°C et 180°C. Concernant les beignets AD, les fluctuations de la température du bain d'huile entre le début et la fin de friture étaient en moyenne de l'ordre de 139-156°C, 151-175°C, 164-184°C respectivement pour 150°C, 165°C et 180°C. Pour les deux types de beignets, entre 100 et 300 secondes, la température au cœur des beignets atteignait 100°C et est restée stable à cette valeur jusqu'à la fin de la cuisson avec de légères variations par essai de friture.

Résultats complémentaires : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets

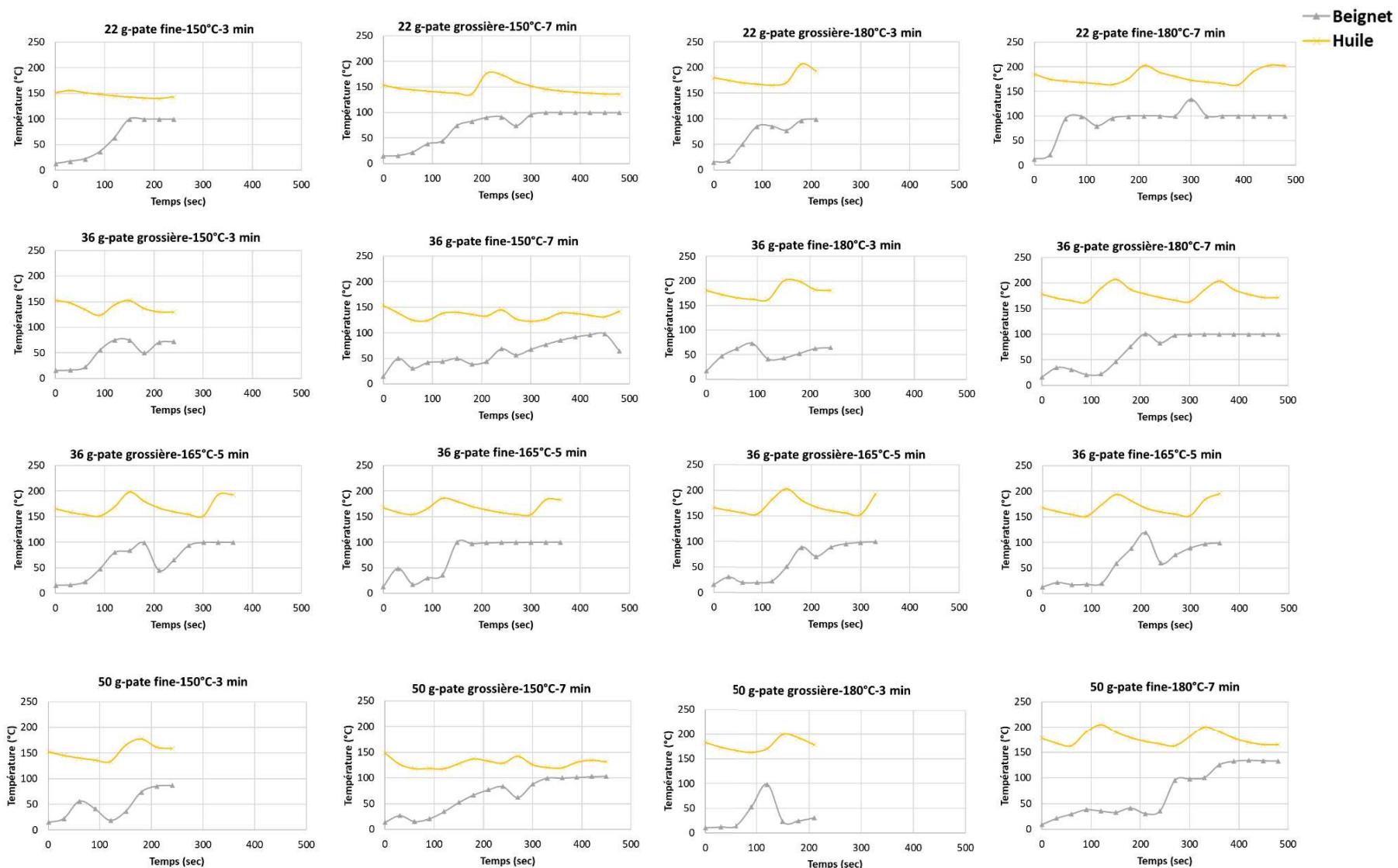


Fig 3. 20 : Evolution de la température dans le bain d'huile et au cœur des beignets AT

Résultats complémentaires : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets

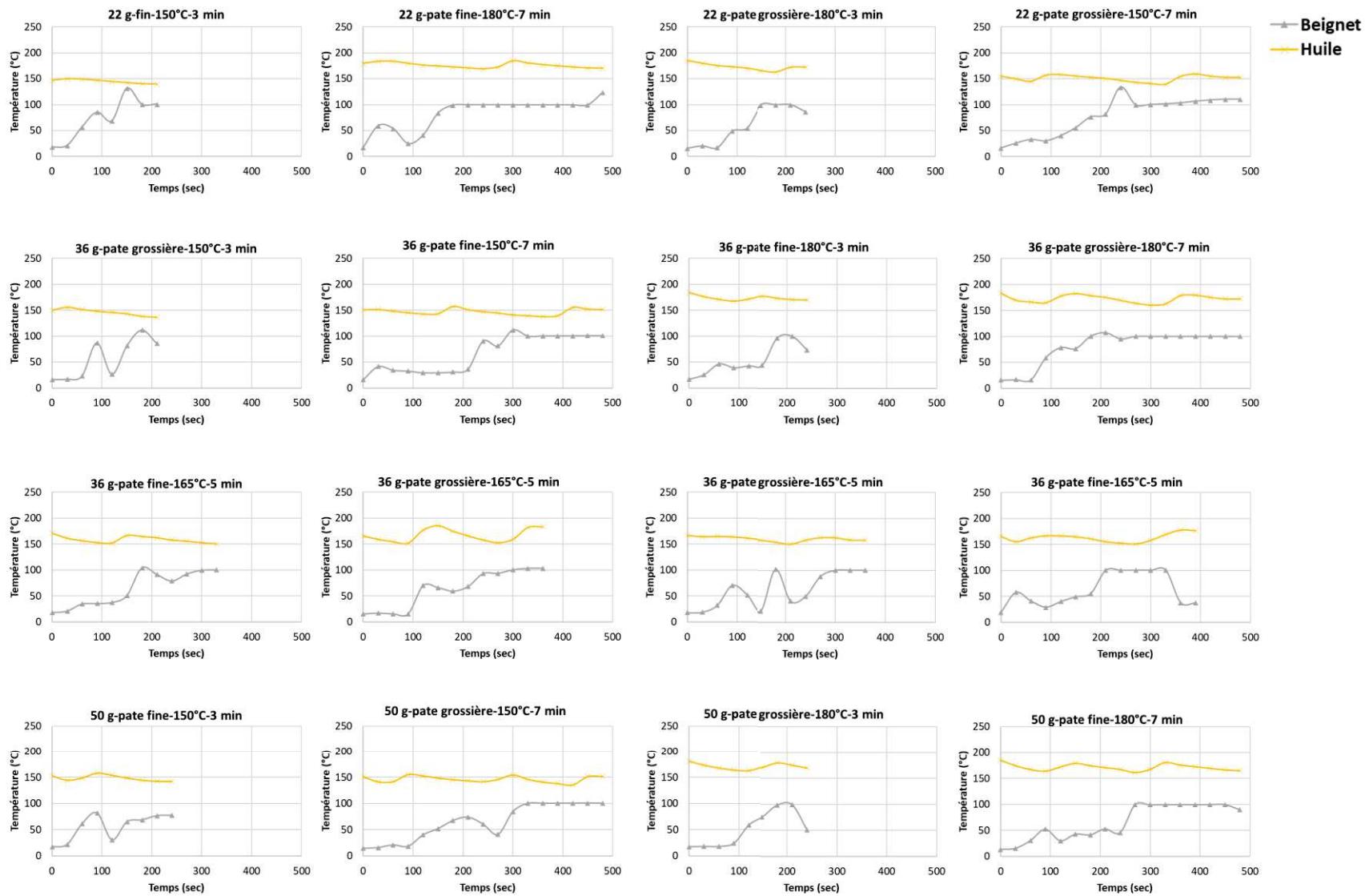


Fig 3. 21 : Evolution de la température dans le bain d'huile et au cœur des beignets AD

3.3. Couleur de la croûte des beignets AT et AD

L'influence des facteurs étudiés sur la couleur de la croûte des beignets est présentée à la figure 3.22. Concernant les beignets AT, un effet quadratique significatif de la masse du pâton a été observé pour les valeurs de a et b. De plus, la température et la durée de friture ont eu un effet significatif sur les valeurs de L, a et b ($p<0,05$). Plus la température et la durée de friture augmentaient, les valeurs de L diminuaient et celles de a et b augmentaient. Concernant les beignets AD, des tendances similaires ont été observées pour l'effet de la température et de la durée de friture sur les valeurs de a et b. Quant à la luminescence L, la granulométrie de la pâte et la température présentaient un impact significatif ($p<0,05$). En moyenne, les valeurs de L, a et b étaient respectivement de 59, 8 et 32 pour les beignets AT, et de 61, 5 et 27 pour les beignets AD. L'observation visuelle des beignets a montré sur l'ensemble des essais des tons de couleurs dorée et marron respectivement pour AT et AD (Fig 3.23).

3.4. Evolution des masses au cours de la friture et dimensions des beignets

Les masses avant friture ont faiblement évolué après la cuisson des deux types de beignets. En moyenne, le ratio de la masse après cuisson et de la masse avant cuisson a varié entre 1 et 1,1 pour les deux types de beignets (Tab 3.19).

Les dimensions des beignets ainsi que celles de la mie (constituant la partie centrale des beignets) dépendaient logiquement de la masse de la pâte utilisée au départ pour la friture. L'épaisseur moyenne de la croute était de 1,25 mm et 2,14 mm respectivement pour AT et AD. En moyenne, la proportion de la croute par rapport à la masse totale des beignets était de 33% pour AT et de 41% pour AD.

Tous les facteurs du plan d'expérience à l'exception de la température, ont présenté un effet significatif sur la proportion de croute pour les beignets AT tandis que pour les beignets AD, les 4 facteurs étudiés ont eu des effets significatifs sur la proportion de croûte formée (figure 3.24). Pour les deux types de beignets, le broyage fin a entraîné une diminution significative du pourcentage de croûte, une augmentation de la masse du pâton a entraîné une diminution du pourcentage de croûte, tandis qu'une durée de friture longue a eu pour résultat une formation importante de croûte. Pour les beignets AD, l'augmentation de la température a entraîné une augmentation du pourcentage de croûte.

Résultats complémentaires : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets

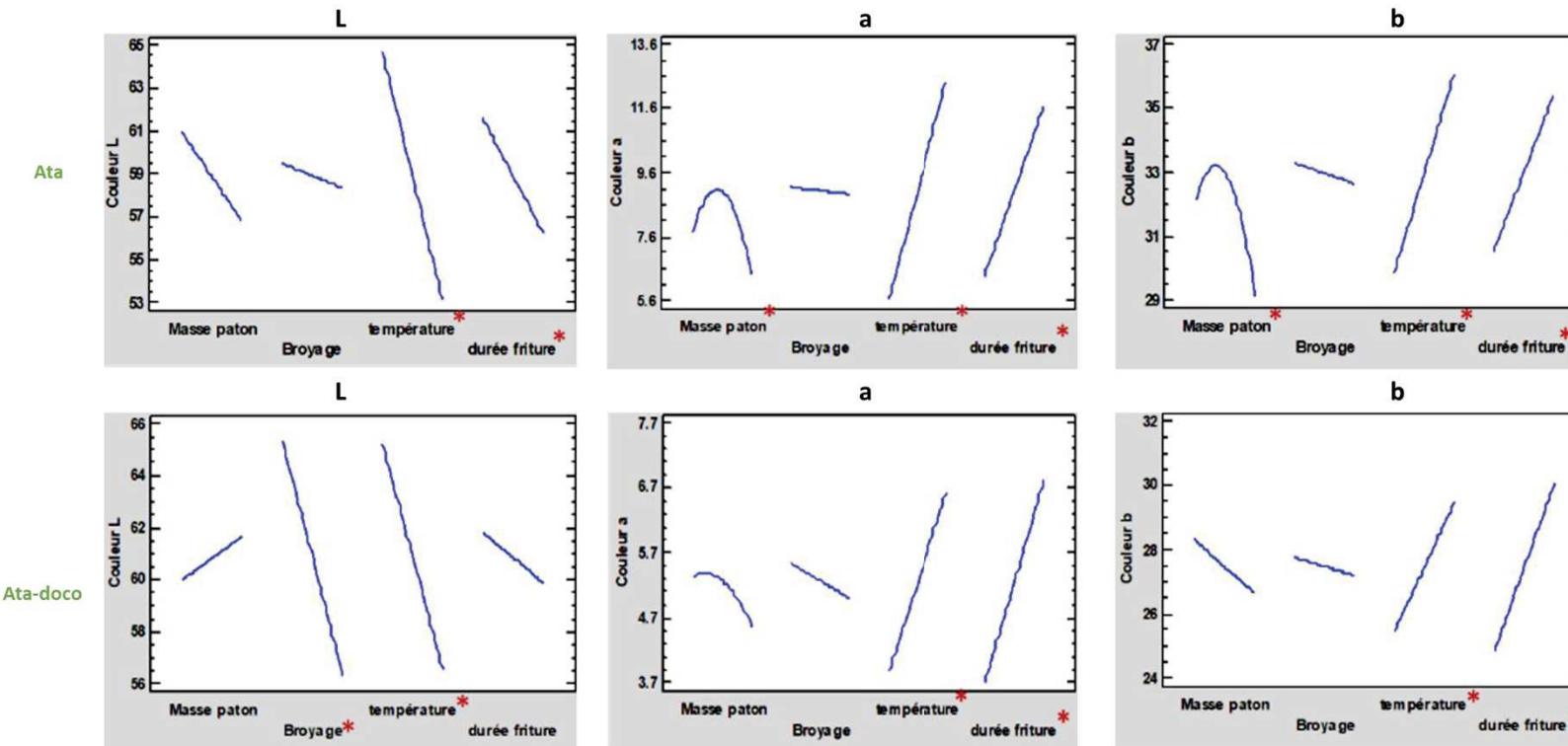


Fig 3. 22 : Effet des facteurs étudiés sur la couleur de la croute des beignets AT et AD

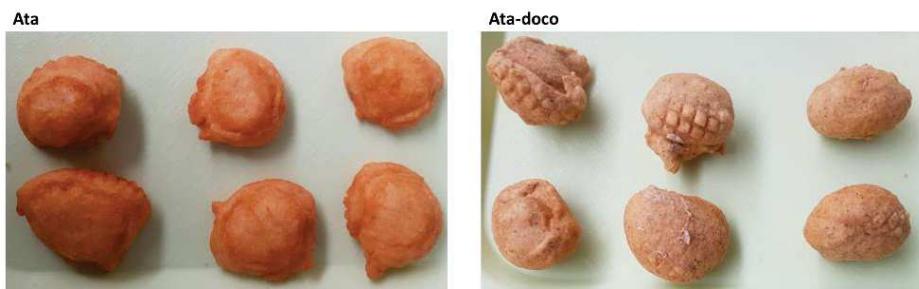


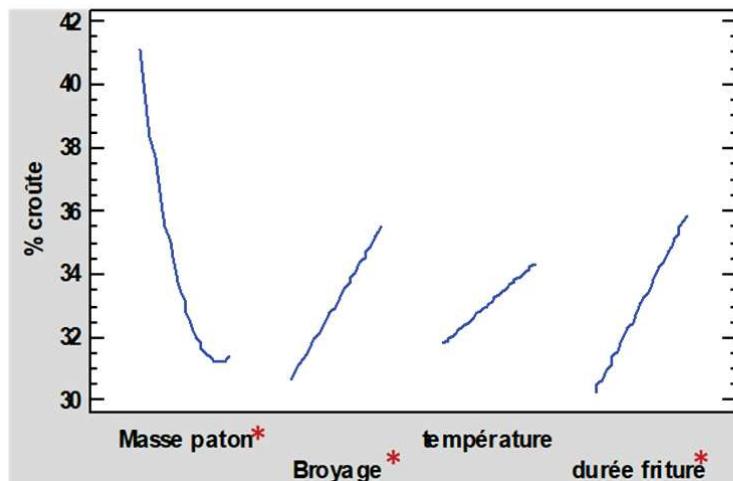
Fig 3. 23 : Photos des beignets Ata (AT) et Ata-doco (AD)

Résultats complémentaires : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets

Tab 3. 19 : Masses et dimensions des beignets, de la mie et de la croute

Type de beignet	Taille des beignets	Masse pâton	Beignets				Mie				Croûte	
			Masse (g)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Masse (g)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Masse (g)	Epaisseur (mm)
Ata	Petite	22,8 ± 1,2	22,3 ± 1,9	50,0 ± 4,7	40,7 ± 3,3	21,3 ± 3,9	13,7 ± 1,8	41,3 ± 4,0	30,7 ± 2,5	15,0 ± 1,3	9,2 ± 1,6	1,3 ± 0,2
	Moyenne	36,2 ± 2,0	36,3 ± 1,9	53,1 ± 3,2	44,6 ± 2,7	30,5 ± 4,2	24,8 ± 2,9	42,1 ± 2,6	35,5 ± 1,7	23,7 ± 2,9	12,0 ± 1,2	1,2 ± 0,2
	Grande	50,7 ± 2,1	51,0 ± 0,9	59,4 ± 0,3	50,8 ± 1,6	32,1 ± 0,6	35,9 ± 3,0	49,0 ± 2,3	40,5 ± 3,5	26,4 ± 2,6	16,0 ± 1,4	1,2 ± 0,2
Ata-doco	Petite	21,8 ± 1,0	23,7 ± 1,9	56,0 ± 9,6	43,1 ± 4,0	28,2 ± 7,1	14,2 ± 2,6	44,2 ± 7,2	31,2 ± 2,3	19,6 ± 4,2	10,5 ± 2,5	1,8 ± 0,5
	Moyenne	36,9 ± 3,0	38,8 ± 3,4	56,1 ± 6,1	47,5 ± 5,3	34,7 ± 4,9	24,1 ± 3,2	44,4 ± 3,0	37,6 ± 3,0	26,1 ± 3,9	15,8 ± 3,3	2,4 ± 0,6
	Grande	51,9 ± 2,9	54,4 ± 2,6	64,7 ± 8,2	51,7 ± 6,3	36,8 ± 7,0	34,3 ± 3,7	53,1 ± 4,8	41,5 ± 4,8	28,8 ± 6,9	20,4 ± 5,2	2,3 ± 0,6

Ata



Ata-doco

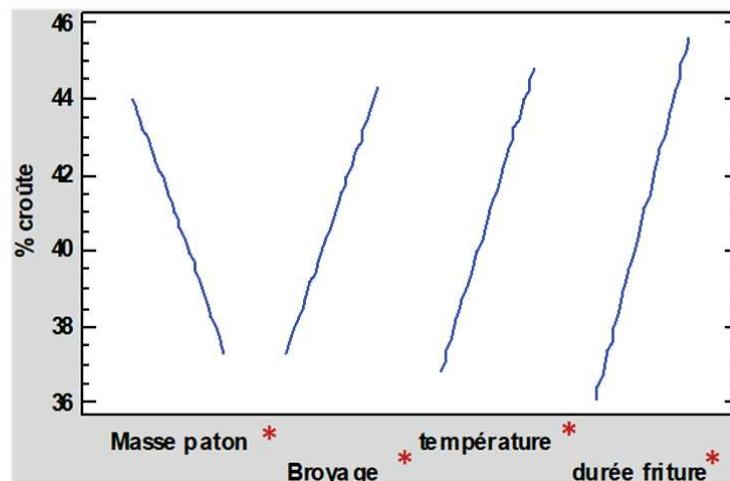


Fig 3. 24 : Effet des facteurs étudiés sur la proportion de croute formée après friture

* : Facteurs ayant un effet significatif ($p < 0,05$).

3.5. Distribution des vitamères de thiamine, des lipides, et de la matière sèche dans la mie, la croute et les beignets

En moyenne, les teneurs en thiamine totale des pâtes utilisées pour la préparation des deux types de beignets n'étaient significativement différentes quel que soit la granulométrie de la pâte (Tab 3.20). Cependant les teneurs des formes phosphatées (TMP et TDP) étaient plus élevées dans les pâtes utilisées pour la préparation des beignets AD (obtenues à partir de graines entières) que dans celles utilisées pour la préparation des beignets AT (obtenues à partir de graines décortiquées et trempées).

Tab 3. 20 : Teneurs moyennes en vitamine B1 ($\mu\text{g/g}$ base humide) des pâtes de AT et AD

Produit	Formes de vitamine B1 (vitamères) et teneur totale			
	Thiamine	TDP	TMP	Total vitamine B1
Ata	Pâte fine	1,7 ± 0,1 ^A	0,2 ± 0,0 ^B	0,04 ± 0,0 ^B
	Pâte grossière	1,7 ± 0,1 ^A	0,1 ± 0,0 ^A	0,01 ± 0,0 ^A
Ata-doco	Pâte fine	1,5 ± 0,1 ^a	0,9 ± 0,1 ^a	0,5 ± 0,0 ^a
	Pâte grossière	1,7 ± 0,0 ^b	0,9 ± 0,0 ^a	0,5 ± 0,0 ^a

Différentes lettres au niveau de chaque sous-colonne indiquent une p-value <0,05.

Pour ce qui est des teneurs en vitamine B1 dans les beignets, les formes phosphorylées (TMP et TDP) étaient majoritaires dans les beignets AD quel que soit la granulométrie de la pâte, tandis que la teneur en thiamine libre étaient plus élevées dans les beignets AT (Tableau 3.21). Malgré de légères variations en termes de vitamères quantifiés dans la mie ainsi et dans la croute, des valeurs similaires en thiamine totale ont été observées dans ces deux parties des beignets. En moyenne, la teneur en thiamine totale était de $2,0 \pm 0,3 \text{ mg}/100 \text{ g}$ et de $2,5 \pm 0,2 \text{ mg}/100 \text{ g}$ respectivement pour les beignets AT et AD.

Concernant les teneurs en matière en sèche, la friture des pâtes de niébé a entraîné une variation spatiale des valeurs de TMS au sein des beignets. Quelle que soit la masse du pâton, les teneurs en matière en sèche de la croute étaient plus élevées que celles mesurées dans la mie, qui sont restées relativement proches des valeurs de TMS mesurées pour les pâtes avant friture (Tableau 6), *i.e.* 30% pour AT et 40% pour AD.

Concernant les teneurs en lipides, les fortes valeurs observées pour les beignets entiers sont dues principalement à la teneur importante de lipides dans la croute (Tableau 3.21). En moyenne, les teneurs en lipides (base humide) étaient respectivement de $11,5 \pm 0,6$ g/100g et de $16,3 \pm 0,7$ g/100g pour les beignets AT et AD. Dans la mie, la moyenne de la teneur en lipides était de $1,3 \pm 0,1$ g/100g pour AT contre $1,6 \pm 0,2$ g/100g pour AD, tandis que dans la croûte, la moyenne pour AT était de $24,0 \pm 5,2$ g/100g contre $27,9 \pm 12,5$ g/100g pour AD.

3.6. Influence des facteurs étudiés sur la teneur en lipides des échantillons

La figure 3.25 présente l'influence de la granulométrie, de la masse du pâton, de la température ainsi que de la durée de friture sur la teneur en lipides dans la mie, la croute et les beignets. Pour la mie des beignets AT et AD, les facteurs ayant un effet significatif étaient la granulométrie de la pâte (fine ou grossière) et la masse du pâton, avec une augmentation de la teneur en lipides quand ces deux paramètres évoluaient de manière croissante. Au niveau de la croute, les effets de la granulométrie de la pâte et de la température étaient significatifs pour les deux types de beignets. Une augmentation de la teneur en lipide a été observée avec la montée en température, et l'imprégnation en huile était plus importante quand les pâtes utilisées ayant des tailles de particules grossières. Concernant les beignets entiers, la teneur en lipides des beignets AT était significativement influencée par la granulométrie de la pâte tandis que celle des beignets AD était simultanément influencée par la granulométrie de la pâte et la température.

Résultats complémentaires : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets

Tab 3. 21 : Répartition de la teneur en matière sèche, des lipides et de la thiamine dans les beignets et au niveau de ces différents compartiments

Pate/Beignets	Taille des beignets	Localisation	Teneur en matière sèche (%)	Lipides*	Thiamine libre*	TDP*	TMP*	Thiamine totale*
				g/100 g	mg/100 g	mg/100 g	mg/100 g	mg/100 g
Ata	Petite	Beignets entiers	47,4 ± 7	12,0 ± 4,8	1,8 ± 0,1	0,1 ± 0,0	0,4 ± 0,3	2,1 ± 0,2
		Mie	30,7 ± 0	1,1 ± 0,4	1,7 ± 0,1	0,1 ± 0,0	0,3 ± 0,2	1,9 ± 0,2
		Croute	58,9 ± 6	23,7 ± 8,2	1,9 ± 0,1	0,1 ± 0,0	0,3 ± 0,2	2,2 ± 0,2
	Moyenne	Beignets entiers	48,1 ± 6	11,1 ± 3,7	1,8 ± 0,3	0,1 ± 0,1	0,1 ± 0,1	1,9 ± 0,3
		Mie	31,1 ± 1	1,2 ± 0,4	1,6 ± 0,2	0,1 ± 0,1	0,1 ± 0,1	1,7 ± 0,2
		Croute	61,5 ± 6	24,0 ± 3,7	2,0 ± 0,2	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,1	2,2 ± 0,2
	Grande	Beignets entiers	46,4 ± 6	12,1 ± 1,7	1,8 ± 0,3	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,2	2,0 ± 0,2
		Mie	30,8 ± 1	1,7 ± 0,3	1,7 ± 0,1	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,2	1,9 ± 0,1
		Croute	62,4 ± 3	24,5 ± 3,7	1,8 ± 0,3	0,1 ± 0,0	0,3 ± 0,2	2,0 ± 0,2
Ata-doco	Petite	Beignets entiers	59,0 ± 5	16,8 ± 9,4	0,7 ± 0,1	0,5 ± 0,0	2,4 ± 0,2	2,5 ± 0,2
		Mie	41,0 ± 0	1,6 ± 1,0	0,7 ± 0,1	0,6 ± 0,1	2,4 ± 0,0	2,6 ± 0,1
		Croute	74,2 ± 8	29,2 ± 13,8	0,5 ± 0,0	0,5 ± 0,1	1,9 ± 0,1	2,0 ± 0,1
	Moyenne	Beignets entiers	60,7 ± 11	16,3 ± 11,9	0,7 ± 0,1	0,5 ± 0,1	2,5 ± 0,2	2,5 ± 0,2
		Mie	41,3 ± 1	1,6 ± 1,2	0,7 ± 0,1	0,5 ± 0,1	2,5 ± 0,1	2,6 ± 0,1
		Croute	70,7 ± 9	27,8 ± 14,2	0,6 ± 0,1	0,5 ± 0,0	1,9 ± 0,2	2,1 ± 0,1
	Grande	Beignets entiers	57,5 ± 7	15,7 ± 9,2	0,7 ± 0,1	0,5 ± 0,1	2,4 ± 0,1	2,5 ± 0,1
		Mie	41,5 ± 2	3,2 ± 3,2	0,7 ± 0,1	0,5 ± 0,1	2,4 ± 0,1	2,5 ± 0,1
		Croute	69,8 ± 9	24,7 ± 17,2	0,5 ± 0,1	0,5 ± 0,1	2,1 ± 0,2	2,1 ± 0,3

* : teneur en base humide (en g ou mg/100 g de beignet tel que consommé)

3.7. Influence des facteurs sur les vitamères de thiamine et la thiamine totale

Les divers vitamères ont montré des comportements différents en fonction du type de beignets. Concernant les beignets AT, aucun effet significatif n'a été observé sur la thiamine libre (tableau 3.22). Une augmentation de la teneur en TMP a été observée dans la mie avec la montée en températures ($p<0,05$), tandis que les teneurs en TDP dans la mie et les beignets entiers étaient significativement influencées par la durée de friture avec une augmentation de leurs valeurs après un long temps de friture. Des interactions entre différents paramètres du plan ont été également observés pour les deux vitamères phosphatés.

Concernant les beignets AD, une influence du broyage et de la durée de friture a été observée sur la teneur en thiamine libre avec une réduction significative quand ces facteurs étaient à leurs points extrêmes. Pour la TDP, une augmentation significative a été observée pour la mie et les beignets entiers avec la montée en température. Cependant pour la TMP, une diminution significative a été observée au niveau de la croûte aux températures élevées. Un broyage fin a favorisé une augmentation de la TMP dans les beignets entiers.

Aucune influence des facteurs du plan d'expérience n'a été observée pour la teneur en thiamine totale de la mie, de la croute et des beignets au cours de la production des beignets AT (Fig 3.26), ce qui suggère surtout des phénomènes d'inter-conversions entre formes de vitamine B1. Pour les beignets AD, le broyage grossier a entraîné une diminution de la thiamine totale. L'effet significatif de la température a été également observé au niveau de la croute des beignets AD, avec une perte importante aux températures élevées. Les interactions entre les différents facteurs n'étaient pas significatives pour les beignets AD.

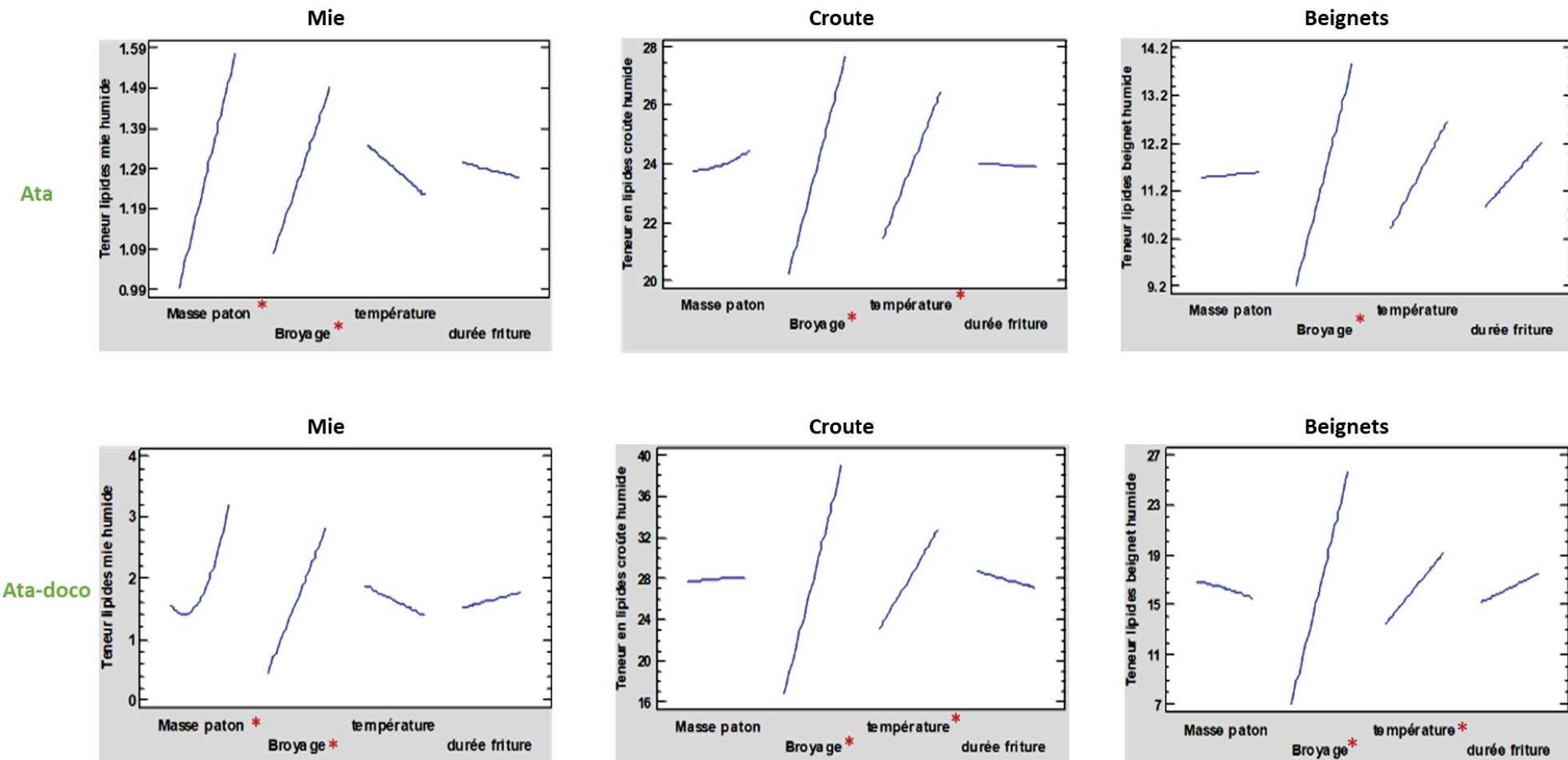


Fig 3. 25 : Effet des facteurs du plan d'expérience friture sur la teneur en lipides (base humide) dans la mie, la croute et les beignets

* : Facteurs ayant un effet significatif ($p<0,05$).

Résultats complémentaires : Etude des procédés traditionnels de fabrication des beignets

Tab 3. 22 : Effets des facteurs du plan d'expérience friture sur les teneurs en thiamine monophosphate, thiamine diphosphate et thiamine libre des beignets Ata et Ata-doco : p-values indiquant le niveau de significativité des facteurs.

Beignets	Facteurs et interactions possibles	TMP			TDP			Thiamine libre		
		Mie	Croute	Beignets	Mie	Croute	Beignets	Mie	Croute	Beignets
Ata	A : Masse pâton	0.3614	0.4959	0.06	0.6823	0.8007	0.5225	0.9641	0.4959	0.9628
	B : Granulométrie de la pâte	0.4759	0.8436	0.2264	0.2124	0.0936	0.1418	0.4581	0.8436	0.5526
	C : température	0.02	0.8621	0.2177	0.1014	0.3370	0.3527	0.6275	0.8621	0.3375
	D : durée friture	0.4828	0.7239	0.5054	0.02	0.0948	0.03	0.6512	0.7239	0.7089
	AA	0.02	0.2969	0.02	0.2197	0.4881	0.1677	0.3143	0.2969	0.8693
	AB	0.1550	0.5652	0.02	0.3620	0.6183	0.3826	0.6266	0.5652	0.7117
	AC	0.03	0.3393	0.01	0.6823	0.4639	0.8954	0.6266	0.3393	0.3992
	AD	0.01	0.2641	0.2980	0.3	0.3414	0.3826	0.3720	0.2641	0.2371
	BC	0.08	0.9802	0.6516	0.07	0.1945	0.0474	0.8160	0.9802	0.5627
	BD	0.3449	0.3323	0.7055	0.03	0.02	0.03	0.4681	0.3323	0.0950
	CD	0.2358	0.4151	0.7581	0.3731	0.2746	0.9330	0.6283	0.4151	0.5727
Ata-doco	A : Masse pâton	0.6296	0.1056	0.5777	0.0924	0.1455	0.1304	0.5619	0.8562	0.3867
	B : Granulométrie de la pâte	0.5423	0.9308	0.003	0.2777	0.6080	0.01	0.7952	0.6315	0.01
	C : Température	0.4387	0.03	0.7399	0.02	0.3016	0.03	0.1234	0.2272	0.003
	D : Durée friture	0.3390	0.5909	0.7585	0.4688	0.04	0.6463	0.3052	0.1203	0.1163
	AA	0.04		0.3219	0.4215	0.0669	0.8572			
	AB	0.2877		0.04	0.4952	0.04	0.4125			
	AC	0.2685		0.0746	0.3557	0.3897	0.2952			
	AD	0.4051		0.2632	0.0894	0.9212	0.4061			
	BC	0.9307		0.0924	0.3193	0.7117	0.2770			
	BD	0.4456		0.4812	0.5833	0.2089	0.3221			
	CD	0.9847		0.1424	0.2116	0.7723	0.4254			

Les valeurs présentées sont des probabilités montrant le niveau de significativité des facteurs. En rouge : effet significatif.

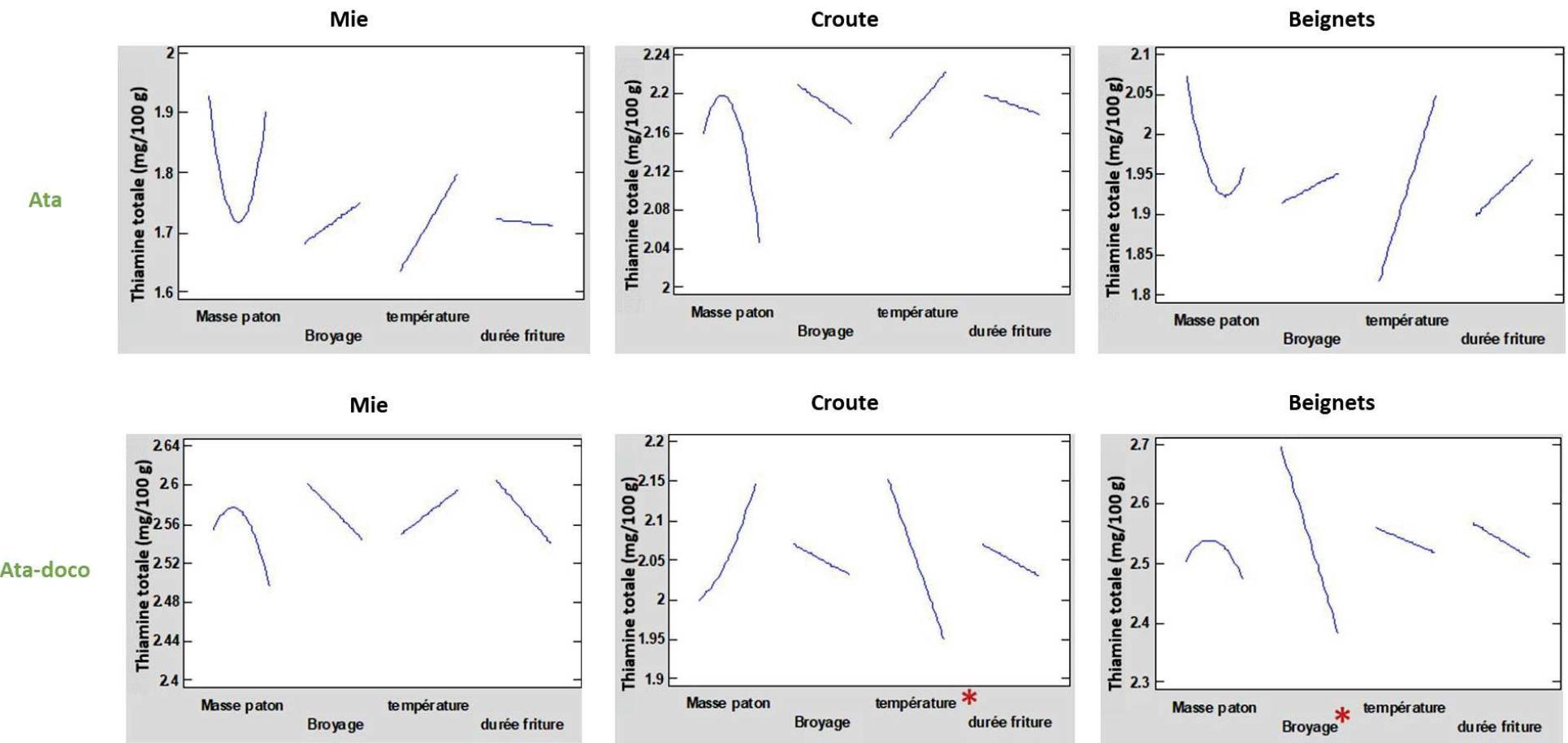


Fig 3. 26 : Effet des facteurs étudiés sur la teneur en thiamine totale (base humide) dans la mie, la croute et les beignets

* : Facteurs ayant un effet significatif ($p<0,05$).

4. Discussion

Dans cette étude, nous avons testé l'impact de quatre facteurs (la granulométrie de la pâte, la masse de la pâte à frire, la température de l'huile, ainsi que la durée de friture) sur les teneurs en vitamine B1 et en lipides dans les beignets de niébé fréquemment consommés au Bénin et localement appelés Ata (à base de graines décortiquées et trempées) et Ata-doco (à base de graines entières).

La préparation des pâtes a été effectuée par mouture humide pour les beignets Ata et par mouture sèche pour Ata-doco. Ces différents types de mouture ont montré de différence concernant la distribution des tailles de particules des pâtes résultantes. Selon Kerr et al., (2000), les particules dont les tailles sont comprises entre 1 à 100 µm représentent les granules d'amidons, tandis que les particules dont les tailles sont entre 100 à 1000 µm correspondent aux agglomérats de parois cellulaires ainsi qu'aux fibres.

La méthode d'ajustement de la teneur en eau des pâtes utilisée dans cette étude a permis d'atteindre les valeurs ciblées de teneur en matière sèche, qui étaient en moyenne de 30 % et 40 % respectivement pour AT et AD. Kethireddipalli et al., (2002a) ont indiqué dans leur étude que la teneur en eau adéquate des pâtes de niébé permettant d'obtenir des beignets non difformes était de 65 % pour les pâtes des graines décortiquées et d'environ 52% pour les pâtes issues de farines hydratées (issues de graines entières broyées). Ils ont relié cette différence à la forte capacité d'absorption d'eau des pâtes de graines décortiqués et trempés par rapport aux pâtes obtenues à partir de farines hydratées.

L'observation visuelle des pâtes des beignets AD a permis de constater une formation de mousse, après l'étape de battage de la pâte obtenue par mouture grossière, du fait de l'incorporation d'air (Fig 3.19). Kethireddipalli et al., (2002b) ont rapporté qu'au cours du battage de la pâte utilisée pour la préparation des beignets, la présence de protéines tensio-actives contribuent fortement à la formation de mousses. En effet, les cotylédons des graines de niébé sont constitués de granules d'amidon incorporés dans une matrice de protéines et entourés d'une paroi cellulaire riche en fibres (Cf. Fig 1.4, Chapitre 1). Un broyage grossier peut entraîner une fragmentation de la matrice protéique avec des granules d'amidon intacts (la farine obtenue dans ce cas serait constituée de petites particules de protéines et de granules d'amidon intacts). Tandis qu'un broyage fin peut endommager les granules d'amidon ce qui pourrait générer une farine composée d'un mélange de fraction protéique et des

constituants de l'amidon (amylose et l'amylopectine). La pureté en fraction protéique de la farine issue d'une mouture grossière pourrait donc expliquer la formation de mousse contrairement à la farine fine.

Concernant la couleur de la croute des beignets AT et AD, l'augmentation des valeurs de a et b observée lorsqu'on monte en température avec une longue durée de cuisson pourrait être un indicateur du degré de cuisson caractérisé par un assombrissement de la couleur des beignets. De plus, les valeurs de b qui étaient plus élevées pour les beignets AT par rapport aux beignets AD correspondent bien aux différences de couleurs observées au niveau de la figure 3.23 (couleur dorée pour AT et marron pour AD).

Pendant la friture, la croûte, précédemment inexiste, se développe à la surface de l'aliment et augmente en épaisseur vers l'intérieur tandis que la région centrale diminue avec le temps (Farinu and Baik, 2005). Nos résultats ont montré qu'une plus faible masse de pâton entraîne une augmentation de la proportion de croûte (Fig 3.24), ce qui pourrait jouer un rôle de barrière et pourrait favoriser une plus faible imprégnation d'huile.

Concernant l'impact des quatre facteurs étudiés sur les teneurs en lipides dans les beignets AT et AD, nous avons observé une réduction de l'absorption d'huile pour les beignets obtenus avec des farines fines. Ces résultats rejettent donc une de nos hypothèses formulées dans la section 3.3.1 (publication 3) qui supposait une forte absorption lors de la friture des pâtes à granulométrie fine (Akissoé *et al.*, 2021). Singh and Seetha, (1993) ont également observé des résultats similaires (réduction de l'absorption d'huile au niveau des pâtes à granulométrie fine) lors de la préparation de beignets à base de pois chiche.

La forte absorption d'huile au niveau des pâtes à granulométrie grossière pourrait être liée à leur forte incorporation d'air au cours du battage qui favoriserait une forte rétention d'huile au niveau des bulles d'air. De plus, les beignets préparés avec des pâtes de granulométrie grossière pourrait former une surface irrégulière ce qui pourrait entraîner une forte absorption d'huile (Dana and Saguy, 2006).

Dans notre étude, les teneurs en lipides des beignets préparés avec des pâtes à granulométrie fine et grossière étaient respectivement en moyenne 9 g/100 g (base humide) et 14 g/ 100 g (base humide) pour les beignets AT. Concernant les beignets AD, les beignets obtenus avec des pâtes de granulométrie fine et grossière présentaient en moyenne des teneurs en lipides de 7 g/100 g (base humide) et 25 g/100 g (base humide). Ces données suggèrent donc que la

préparation de beignets avec des pâtes de granulométrie fine permettrait une réduction de 68% et 53% respectivement pour les valeurs moyennes de teneurs en lipides des beignets AT (28 g/100 g base humide) et AD (15 g/100 g base humide) qui ont précédemment été observées sur le terrain (Akissoé *et al.*, 2021).

Pour ce qui est de l'évolution des teneurs en vitamine B1, une diminution de la TDP et une augmentation de la TMP ont été observées pour les deux types de beignets dans la croûte, la mie et les beignets entiers. Cela pourrait être liée à une conversion de la forme TDP en TMP. La teneur en thiamine totale était par contre très peu diminuée au cours de la friture. En effet, la friture présente deux avantages principaux par rapport aux autres méthodes de cuisson, permettant de limiter les pertes en vitamines thermosensibles (Fillion and Henry, 1998). Il s'agit de la température au cœur du produit excédant rarement 100°C (comme observées dans le cadre de notre étude, figures 3.20 et 3.21) et des temps de fritures généralement courts.

5. Conclusion

Dans cette étude, nous avons pu mettre en évidence l'impact de quelques paramètres technologiques (granulométrie de la pâte, masse des pâtons, température et durée de friture) sur l'évolution des teneurs en lipides et thiamine au cours de l'étape de friture, essentielle pour la production des beignets à base niébé fréquemment consommés au Bénin. Les résultats obtenus ont très clairement montré les bénéfices d'une granulométrie fine de la pâte pour diminuer l'absorption d'huile au cours de la friture, et ainsi réduire la teneur en lipides des beignets. La friture n'a pas entraîné de perte importante de thiamine, suggérant que du fait de durées de friture relativement courtes, cette étape du procédé permet de préserver la vitamine B1 initialement présente, ce qui est une bonne chose pour les consommateurs.

Chapitre 4 : Discussion générale

Un potentiel effet-santé est attribué au niébé (*Vigna unguiculata*) en raison de sa composition en protéines, en fibres, en minéraux, en folates (Gonçalves *et al.*, 2016), et composés bioactifs tels que les flavonoïdes et les acides phénoliques (Awika and Duodu, 2017).

L'objectif principal de ces travaux de recherche était de participer à la prévention des carences nutritionnelles au Bénin, dans un contexte rural et urbain, à travers la promotion d'aliments ressources locaux, comme le niébé. L'approche utilisée pour atteindre cet objectif a été de réaliser une étude diagnostic de la consommation des plats traditionnels à base de niébé dans le sud du Bénin à travers des enquêtes de fréquence de consommation alimentaire (FFQ). Ces enquêtes ont été réalisées dans trois localités que sont : Cotonou (grande agglomération urbaine), Adjohoun (zone rurale de forte production de niébé) et Allada (zone rurale de faible production de niébé).

Au total, la consommation de neuf plats traditionnels à base niébé a été étudiée. Il s'agit de : Abobo, Ata, Atassi, Ataclè, Vêyi, Abla, Djongoli, et Adowè (Annexe 5, figure 1S). Ils représentent les aliments traditionnels à base de niébé les plus populaires parmi les 18 plats identifiés par Madode *et al.* (2011). En fonction des ingrédients qu'ils contiennent et du type de procédé subi, ces neuf plats de niébé ont été classés en trois groupes différents à savoir :

- Les ragouts/purée : Abobo, Vêyi, Adowè
- Les beignets : Ata, Ata-doco, Ataclè
- Les plats mixtes : Atassi, Djongoli, Vêyi

Parmi ces plats traditionnels de niébé fréquemment consommés par la population béninoise, les beignets de niébé ont été sélectionnés en vue d'étudier leur procédé de fabrication, et d'améliorer leur qualité nutritionnelle.

Les résultats issus de ces travaux de thèse ont permis des valorisations sous forme d'articles scientifiques dont un article paru (impact des procédés traditionnels de fabrication des beignets sur les nutriments d'intérêt nutritionnel), deux articles en préparation pour soumission (résultats des enquêtes de consommation des plats de niébé) et au moins un article en perspective (optimisation des procédés de fabrication des beignets de niébé).

Dans ce chapitre, une synthèse des différents résultats obtenus a été réalisée. Quelques résultats supplémentaires et expérimentations non concluantes sont également discutés.

4.1. Détermination de la composition nutritionnelle des plats traditionnels de niébé

Cette étude nous a permis de déterminer la composition nutritionnelle des plats traditionnels de niébé, par analyse de la composition globale (protéines, fibres, lipides, cendres), le dosage des minéraux (Fe, Zn, Ca, Mg, K), des folates totaux (vitamine B9) et de la thiamine totale (vitamine B1). Les alpha-galactosides et les phytates, composés bioactifs présentant des effets négatifs et/ou positifs, ont également été analysés.

L'analyse de la composition nutritionnelle des plats a montré des profils nutritionnels similaires par groupe de plats traditionnels de niébé (tableau).

Tab 4. 1 : Composition nutritionnelle par groupe de plats à base de niébé

Pour 100 g de plat		Ragouts	Beignets	Plats mixtes
Macronutriments	Eau (g)	66-73	24-48	63-69
	Energie (kcal)	87-106	278-446	115-165
	Protéine (g)	6,3-7,5	7,4-9,9	3,0-4,2
	Lipide (g)	0,4-0,6	16,5-33,3	0,7-10,2
	Glucide (g)	14,3-16,7	18,7-23,9	13,6-23,7
	Fibre (g)	5,0-7,2	4,7-7,0	2,7-5,2
	Cendres (g)	1,5-1,9	2,0-2,2	1,0-1,3
Minéraux	Fe (mg)	1,1-1,5	4,1-4,2	0,4-3,0
	Zn (mg)	0,9-1,1	1,2-1,6	0,3-0,8
	Ca (mg)	25,7-30,3	28-33	8,2-25,0
	Mg (mg)	36-46	50-68	13-39
	K (mg)	258-323	333-500	90-193
Vitamines	Folates (µg)	56,2-65,1	74-84	12,2-48,0
	Thiamine (µg)	28,4-89,6	133-175	34,3-50,3

Les beignets de niébé présentaient des teneurs élevées en lipides du fait de l'absorption importante d'huile au cours de la friture. Les teneurs en fer les plus élevées ont été obtenues pour les beignets comparativement aux autres groupes de plats traditionnels de niébé. En effet, le procédé de transformation des beignets implique des étapes de transformation nécessitant l'utilisation de moulin (concassage, mouture) qui pourrait entraîner des contaminations en fer. Des études réalisées sur des aliments traditionnels du Burkina-Faso à base du mil et du sorgho (Icard-Vernière *et al.*, 2013) et du Bénin (pâte de maïs) (Greffeuille *et al.*, 2011) ont en effet montré qu'une contamination en fer se produisait au cours de ces opérations unitaires. Cependant, ce fer de contamination a peu d'intérêt sur le plan nutritionnel car il présente une faible biodisponibilité.

Concernant les plats mixtes de niébé (Atassi, Abla, Djongoli), leur avantage est lié au mélange du niébé et de céréales au sein d'un même plat. Ceci permet de compenser les déficits en acides aminés de ces deux ingrédients pris individuellement. En effet, les légumineuses possèdent de faibles teneurs en acides aminés soufrés, contrairement aux céréales (Maphosa and Jideani, 2016). Cependant, dans notre étude l'aspect lié à la qualité des protéines (dosage des acides aminés) n'a pas été étudié. Le plat mixte Atassi contient de faibles teneurs en protéines, minéraux, folates et thiamine comparativement aux autres plats traditionnels de niébé, ce qui est lié aux ingrédients de ce plat, préparé avec un ratio moyen de 1:4 de niébé/riz (Madode *et al.*, 2011).

Les apports en énergie pour 100 g de plat variaient en moyenne entre 284-449 kcal, 119-169 kcal et 94-116 kcal respectivement pour les beignets, les plats mixtes et les ragouts. En considérant ces apports énergétiques, nous avons observé que les ragouts de niébé présentaient des densités nutritionnelles intéressantes comparativement aux autres groupes d'aliments traditionnels à base de niébé. Par exemple pour les protéines, la densité nutritionnelle était en moyenne de 6,5 g/100 kcal dans les ragouts, 2,7 g/100 kcal pour les plats mixtes et 2,4 g/100 kcal pour les beignets. Pour les folates, les valeurs moyennes obtenues étaient de 70 µg/100 kcal pour les ragouts, 22 µg/100 kcal pour les plats mixtes et 20 µg/100 kcal pour les beignets (Annexe 5, table 6S).

4.2. Détermination des fréquences de consommation et quantités consommées des plats de niébé

A travers la réalisation d'enquêtes de fréquences de consommation ou FFQ (sur une période rétrospective d'une semaine³) auprès de 1217 adultes âgés de 19 à 65 ans, des données relatives aux fréquences et aux quantités de consommation des neuf plats traditionnels de niébé ont été collectées.

Les résultats de cette étude ont montré qu'à Cotonou ainsi que dans les zones rurales étudiées, la consommation du niébé est généralement élevée (≈98% des enquêtés). Une fréquence de consommation du niébé d'au moins 1 fois/semaine par 70 à 87% des adultes a été observée au sein des populations enquêtées.

³ Cette période sera désignée comme « la semaine des FFQ » dans la suite de la discussion

Au cours de la semaine sur laquelle les enquêtes ont été réalisées, les plats traditionnels Abobo (76%⁴), Atassi (77%⁴) et Ata (61%⁴) étaient très consommés à Cotonou tandis que dans les zones rurales enquêtées, on note une proportion importante de consommation des plats Abobo (91%⁵), Atassi (81%⁵) et moindre pour Ata (22%) (Tableau 3.7).

Des différences significatives ($p < 0,05$) ont été observées pour les tailles de portions (consommation au cours d'un repas) habituellement consommées entre Cotonou et les zones rurales (à l'exception des plats Adowè, Abla, Atassi et Véyi). Les tailles de portions étaient significativement supérieures à Cotonou pour les plats Ata, Ata-doco et Abobo comparativement aux zones rurales. Tandis que pour les plats Ataclè et Djongoli, l'inverse a été observé (Tableau 3.7).

Les fréquences de consommation hebdomadaire des différents plats par l'ensemble des consommateurs de niébé (n=626 à Cotonou et n=565 dans les zones rurales) variaient entre 0,1 à 2,1 fois par semaine à Cotonou selon le plat considéré, tandis que dans les zones rurales les fréquences observées étaient comprises entre 0,1 à 2,4 fois par semaine (Tableau 3.7). La somme de ces fréquences permet de déduire que les consommateurs de niébé dans les zones de notre étude consomment en moyenne plus de 7 fois un plat à base de niébé par semaine. En utilisant les fréquences de consommation hebdomadaire (ramenées en fréquences journalière en divisant par 7), les tailles de portions, les rendements de décorticage le cas échéant et les proportions des graines de niébé dans les différents plats traditionnels, nous avons estimé dans notre étude les quantités journalières de graines de niébé consommées. Les valeurs obtenues étaient au total 71 et 58 g/jour/adulte respectivement pour la ville Cotonou et dans les zones rurales enquêtées, soit une consommation annuelle (en considérant 365 jours) d'environ 21 à 26 kg de graines/an/adulte. Afin de garantir une alimentation saine et durable, la commission du « Eat Lancet » a proposé un régime alimentaire de référence dans lequel la quantité journalière de légumineuses à graines sèches est estimée à 50 g/jour soit 18 kg/personne/an (Willett *et al.*, 2019). Sur la base des résultats obtenus dans notre étude, on peut donc déduire que les quantités de consommation du niébé dans les zones étudiées au sud du Bénin sont en adéquation avec la recommandation de la commission du Eat lancet.

⁴ Pourcentages calculés par rapport à l'effectif des consommateurs de niébé à Cotonou au cours de la semaine des FFQ (n=578).

⁵ Pourcentages calculés par rapport à l'effectif des consommateurs de niébé dans les zones rurales au cours de la semaine des FFQ (n=545).

Les quantités journalières de graines de niébé consommées déterminées dans notre étude sont proches de la valeur moyenne (77 g/jour) obtenue par Delisle et al., (2012) pour la consommation de légumineuses et de noix dans différentes localités au sud du Bénin que sont : Cotonou (grande agglomération urbaine), Ouidah (petite agglomération urbaine) et zones rurales situées aux alentours de la ville de Ouidah.

Dans les années 90, Langyintuo et al., (2003) ont estimé la quantité moyenne de niébé consommée au Bénin à 9 kg/an/personne sur la base des données de la FAO et des institutions statistiques des pays de l'Afrique subsaharienne. Gandonou et al., (2019) ont déterminé une quantité consommée au niveau national qui était d'environ 7 kg/an/adulte en utilisant des données d'une enquête de consommation alimentaire par rappel de 24h réalisée en 2008. Les données de ces deux derniers travaux sont faibles par rapport aux quantités déterminées dans notre étude, suggérant une sous-estimation ou une progression notable de la consommation.

Après la détermination de la composition nutritionnelle des plats traditionnels et l'estimation des quantités consommées, la suite de l'étude a été de calculer les pourcentages de contribution nutritionnelle de ces plats aux apports journaliers recommandés (AJR) afin d'évaluer leur part à la satisfaction des besoins nutritionnels des adultes dans les zones étudiées.

4.3. Estimation de la contribution nutritionnelle des plats de niébé aux apports journaliers recommandés

En utilisant les données de quantités journalières moyennes consommées de chacun des neufs plat à base de niébé considérés (obtenues sur la base des tailles de portions⁶ habituelles et des fréquences de consommation journalières⁷) et les données de composition nutritionnelle des plats, , la contribution nutritionnelle des plats de niébé aux apports journaliers recommandés au sein de la population adulte de Cotonou et des zones rurales étudiées a pour la première fois été calculée. Globalement, les différents plats à base de niébé, dans les conditions de consommation actuelle, permettent des couvertures moyennes (Cotonou et zones rurales) de 42% pour les fibres, de 26% pour les protéines pour une contribution énergétique équivalent à 15% des besoins moyens. Concernant les minéraux,

⁶ Quantités habituellement consommées lors d'un repas

⁷ Fréquence hebdomadaire divisée par 7 jours

nous avons obtenu en moyenne 37% pour le magnésium, 17% pour le potassium, 18% zinc. Les contributions aux apports recommandés en calcium et fer étant faibles (7 à 10%).

4.4. Participation des plats de niébé à la sécurité alimentaire

Sur la base des données des discussions de groupes focalisées, il a été constaté dans notre étude que les profils de consommation étaient similaires en zones rurale et urbaine. La consommation alimentaire était principalement basée sur des aliments céréaliers, les racines et tubercules, les légumineuses, et les légumes feuilles. Des tendances similaires ont été également observées par Gandonou et al., (2019). Bricas et al., (2016) ont rapporté que même si les populations rurales autoproduisent encore une part importante de leur alimentation, ils recourent largement au marché pour leurs approvisionnements ce qui tend à rapprocher les déterminants de leur sécurité alimentaire de celle des urbains.

Gandonou et al., (2019) ont montré que le régime alimentaire de la population béninoise – caractérisé par la consommation régulière de maïs, de riz, d'igname, de gari (semoule de manioc fermenté), et de niébé – contribue en moyenne à des apports en énergie et protéines respectivement estimés à 2652 kcal et 67 g de protéines par jour (assez proche pour l'énergie, et supérieur pour les protéines aux apports journaliers recommandés de 2500 kcal et 54 g de protéines (annexe 5, table 2S)). Dans notre étude, les apports énergétiques journaliers moyens à partir des neuf plats à base de niébé au cours de la semaine des FFQ étaient de 404 kcal et 362 kcal respectivement à Cotonou et dans les zones rurales étudiées (Figure 4.1). Ces valeurs représentent environ 15 % des apports en énergie des aliments habituellement consommés au Bénin.

Concernant les protéines, la quantité journalière totale apportées par la consommation des plats à base de niébé au cours de la semaine des FFQ était de 14,6 g/jour et 13,2 g/jour respectivement à Cotonou et dans les zones rurales (Figure 4.1). Ces valeurs représentent environ 20-21% des apports en protéines des aliments habituellement consommés au Bénin. Sur la base de ces données, nous pouvons donc conclure que les plats traditionnels de niébé contribuent significativement à la sécurité alimentaire au Bénin.

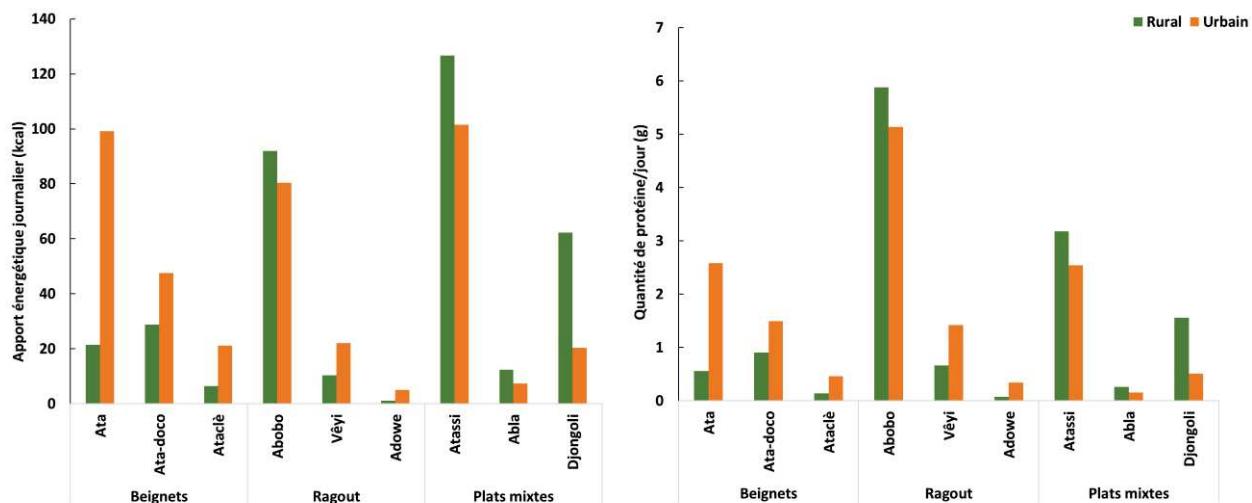


Fig 4. 1 : Apport en énergie (kcal) et en protéines (g) des plats à base de niébé au cours de la semaine précédent l'enquête FFQ

4.5. Identification des déterminants de la consommation du niébé à Cotonou et dans les zones rurales : motivations et freins à la consommation du niébé

Notre étude a révélé, à travers les discussions de groupe, que les facteurs poussant la population à la consommation du niébé étaient liés au goût pour les aliments traditionnels à base de niébé, leur capacité rassasiante, ainsi qu'à une perception positive par la population des bienfaits du niébé sur la santé. Cependant, malgré le potentiel de ces aliments à la satisfaction des besoins nutritionnels, certaines contraintes à la consommation ont été notées (Tableau 3.2). Nous avons identifié l'indisponibilité de certains aliments traditionnels de niébé en restauration hors domicile (par exemple le plat mixte Abla et le beignet Ataclè), la disparition de certaines recettes traditionnelles (liée à une perte de savoir-faire culinaire), et la préférence pour d'autres aliments, autant de facteurs qui pourraient entraîner une baisse de la consommation de niébé dans les années à venir. Les problèmes digestifs n'étaient pas systématiquement pointés comme frein à la consommation du niébé, même si 40 et 62% des consommateurs de niébé respectivement en zone urbaine et dans les zones rurales ont évoqué l'apparition d'inconforts digestifs⁸ après consommation du niébé (annexe 4, figure 2S). Les plus cités étaient les flatulences – largement évoquées en zones rurale (72%) tout comme à Cotonou (50%) –, les douleurs abdominales – plus citées en zone urbaine (68%) qu'en zones

⁸ Les enquêtés avaient la possibilité de choisir plusieurs réponses possibles.

rurales (24%) – et la constipation – très mentionnée en zones rurales (78%) par rapport à Cotonou (10%) –.

Les alpha-galactosides, oligosides indigestibles, sont les principaux composés responsables des problèmes de flatulence dans les légumineuses. Mais à petite dose, ils présentent un effet positif en jouant le rôle de prébiotiques sur les bactéries bénéfiques du microbiote intestinal. L'analyse des neuf plats traditionnels de niébé a révélé des teneurs en alpha-galactosides totaux qui variaient entre 0,3 et 1,8 g/100g (base humide) (annexe 5, tableau 7S) et qui étaient particulièrement élevées dans les beignets (1,3 à 1,8 g/100g). Des teneurs similaires ont été obtenues dans l'étude des procédés traditionnels de Ata et Ata-doco (environ 1,6 g/100 g ; cf. table 5S annexe 6). En considérant les tailles de portions moyennes ingérées par les consommateurs des différents plats de niébé, nous obtenons des quantités d'alpha-galactosides totaux variant entre 0,7-4,7 g/portion dans les zones étudiées (figure 4.2). Martínez-Villaluenga et al., (2008) ont rapporté que la consommation d'une quantité de 3 g d'alpha-galactosides favorise la prolifération des bifidobactéries, tout en entraînant des troubles digestifs modérés. Au-delà de cette valeur, les troubles intestinaux et notamment les flatulences pourraient devenir rédhibitoires. Dans notre étude, les plats à base de niébé les plus à risque sont ceux présentant des teneurs élevées en alpha-galactosides couplées à des portions élevées consommées, soit les ragoûts Abobo et Vêyi ainsi que Ata-doco et Ataclè en milieu urbain (figure 4.2). Et dans le cas où plusieurs plats de niébé sont consommés au cours d'une même journée, les risques de troubles intestinaux seraient très élevés. Il s'avère donc important d'identifier des techniques pouvant réduire davantage les alpha-galactosides au cours de la transformation.

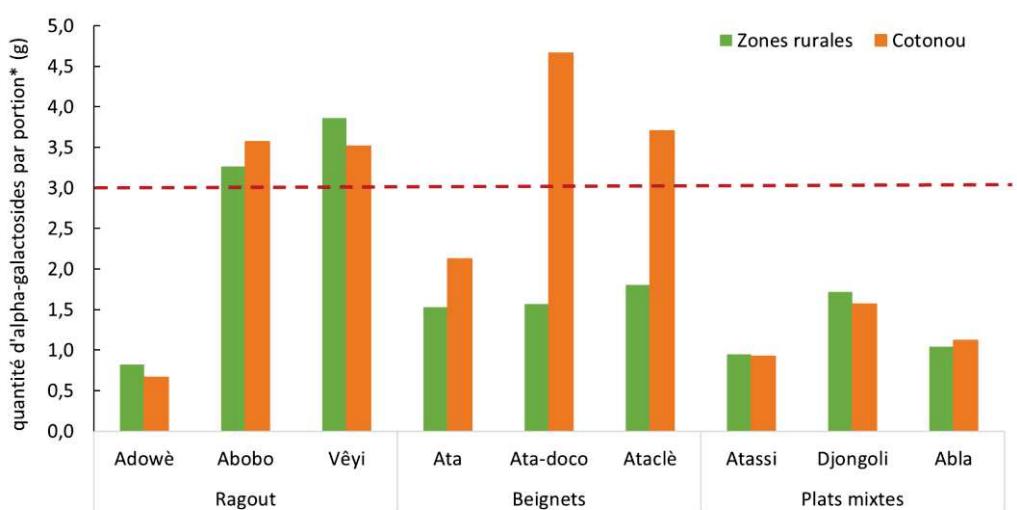


Fig 4. 2 : Quantités d'alpha-galactosides consommées par portion moyenne consommée pour chaque plat de niébé

* : Utilisation des tailles de portion habituelles moyennes (cf. tableau 3.7). La ligne en pointillés représente le seuil indiqué par Martínez-Villaluenga et al., (2008) au-dessus duquel les problèmes de flatulence sont trop importants.

Afin de réduire les teneurs en alpha-galactosides dans les plats traditionnels de niébé tout minimisant les pertes en composés d'intérêt nutritionnel, des travaux antérieurs ont été réalisés sur le procédé de fabrication de ragouts de niébé (cuisson à l'eau) (Madode, 2012; Coffigniez, 2018).

4.6. Mise en évidence des étapes de transformation des beignets de niébé influençant la qualité nutritionnelle des beignets Ata et Ata-doco

Dans cette partie de l'étude, les composés d'intérêt étudiés étaient les minéraux (Fe, Zn, Ca, Mg, K), les folates et les alpha-galactosides. La méthode d'analyse de la vitamine B1 n'étant pas encore développée lors de cette phase, le dosage n'a pas été effectué. Des échantillons ont été collectés auprès de productrices locales au cours de différentes étapes des procédés de préparation des deux types de beignets, puis analysés en laboratoire.

Les principales étapes de production des beignets Ata sont le décorticage, le trempage, la mouture par voie humide, le battage et la friture (figure 4.3). Quant aux beignets Ata-doco, les étapes de production sont la mouture par voie sèche, l'hydratation de la farine, le battage et la friture. En effet, la différence entre les procédés de préparation des deux types de beignets, confère aux beignets Ata un aspect raffiné du fait de sa couleur homogène et dorée comparativement aux beignets Ata-doco. D'après les données des FFQ, nous avons observé que les beignets Ata étaient largement consommés par population de Cotonou comparativement aux zones rurales (61% vs. 22%) tandis que pour les beignets Ata-doco, le cas contraire a été observé (16% vs. 30%). Ces résultats pourraient être liés à la transition alimentaire qui entraîne souvent une augmentation de la consommation d'aliments plus raffinés.

Le procédé de fabrication des beignets Ata étant plus complexe que celui de Ata-doco, un bilan matière a été réalisé afin d'évaluer la manière dont les alpha-galactosides et les folates

initialement présents dans la matière première sont distribués parmi les différentes fractions générées au cours du procédé. Pour ce bilan matière, nous nous sommes limités à ces deux composés, l'un considéré comme « négatif » et l'autre comme « positif ».



Fig 4. 3 : Photos des étapes de production des beignets Ata

En comparant les procédés de fabrication des deux types de beignets⁹, une réduction importante des alpha-galactosides (22-57%) a été observée dans la pâte battue des beignets Ata-doco comparativement à celle des beignets Ata (qui ne présentait aucune diminution des alpha-galactosides) (figure 3.5). Nous avons relié cette différence à l'activité des alpha-galactosidases qui pourrait être inhibée dans la pâte utilisée pour la préparation des beignets Ata. En effet, au cours du procédé de fabrication des beignets Ata, nous avons observé une surproduction de galactose (annexe 6, figure 1S) après l'étape de trempage (absente dans le cas de Ata-doco). Or, il a été montré que le galactose entraîne une inhibition de l'activité des alpha-galactosidases (Coffigniez *et al.*, 2018b).

Suite aux premières investigations effectuées auprès des productrices locales, nous avons observé au cours de la production des beignets Ata une diminution de 25 à 30% des teneurs en folates entre les gritz trempés et la pâte battue (Tableau 3.10). Sur la base de ces résultats, nous avons supposé une perte des folates par oxydation en raison de l'incorporation de l'air dans la pâte au cours de l'étape de battage. En effet, lors de la préparation des beignets de niébé, de l'air est incorporé à la pâte au cours du battage, afin de donner une texture alvéolée aux beignets après friture (Mcwatters *et al.*, 2007). Dans le cadre de notre étude, nous avons voulu vérifier, via des essais de battage en laboratoire (à l'aide d'un robot pâtissier), si l'incorporation d'air influençait la teneur en folates de la pâte. Sur le terrain, les durées de battage effectivement utilisées par les productrices au cours du procédé des beignets Ata étaient de 9 à 50 min (figure 3.4). Nous avons effectué une cinétique de battage à vitesse maximale du robot pâtissier (position 5) pendant 2, 20 et 40 min. Les résultats obtenus montraient une faible variation de la teneur en folates au cours du battage (Figure 4.4). Ainsi, notre hypothèse concernant la perte des folates au cours de l'étape en raison de l'incorporation de l'air au battage n'a pas été validée.

⁹ Dans cette partie de la discussion nous allons nous focaliser sur les alpha-galactosides, les folates et les lipides

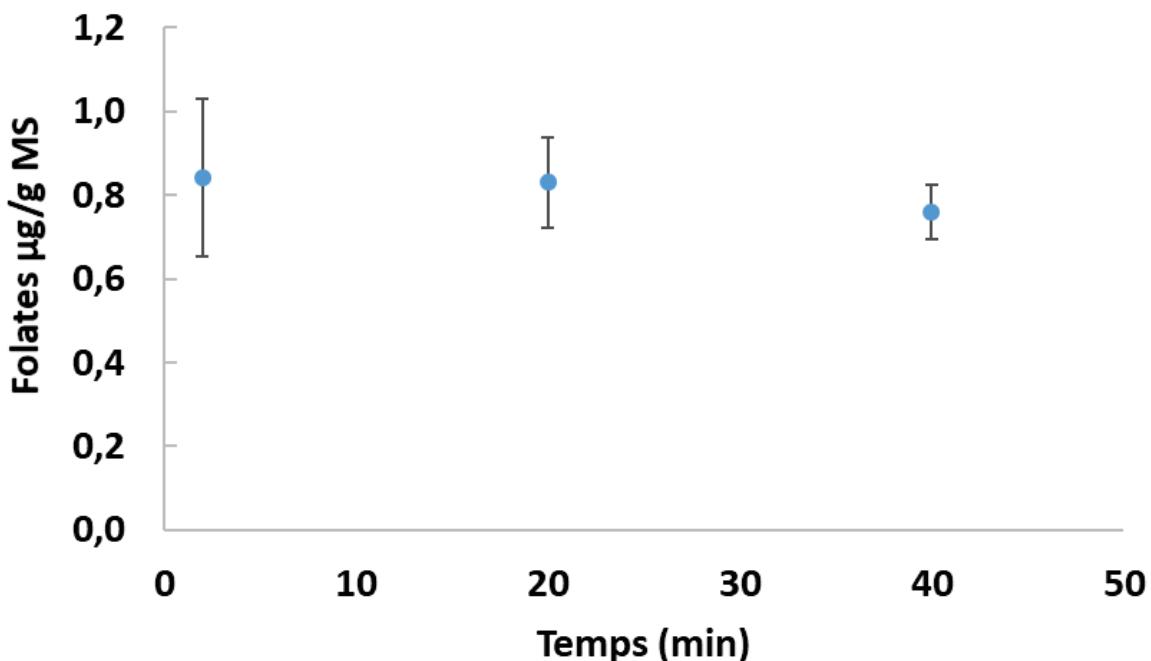


Fig 4. 4: Test en laboratoire sur l'effet de la vitesse de battage sur la teneur en folates

Le bilan matière réalisé auprès des productrices au cours du procédé de Ata a montré une perte totale de 60% des folates totaux dont 26% au cours du procédé de trempage (avec 4% retrouvés dans l'eau de trempage, ce qui suggère une dégradation de 22%) (figure 3.6). En effet, dans une étude réalisée au cours du trempage des graines de niébé en vue de comprendre le comportement des folates, il a été montré qu'à température ambiante (30°C), la diffusion n'était pas le phénomène prédominant. Des inter-conversions enzymatiques des vitamères de folates (Acide folique, 5-Formyltetrahydrofolate, 10-Formyle acide folique) en 5-methyltetrahydrofolate étaient observées à cette température (Coffigniez *et al.*, 2019b). Cependant, le 5-methyltetrahydrofolate est moins stable comparativement aux autres vitamères de folates (Delchier *et al.*, 2016b) et peut être sujet à une dégradation par oxydation. Ceci pourrait expliquer les 22% de dégradation observés dans notre étude au cours du trempage des gritz de niébé par les productrices.

Nous avons observé une forte incorporation d'huile dans les beignets lors de l'étape de friture. La teneur en lipides avait augmenté de 11 à 33 fois par rapport à la teneur initiale dans les graines de niébé (1,6 g/100 g MS). Cette forte et très variable incorporation d'huile dans les beignets a entraîné une dilution des teneurs des autres composés, et c'est cette dilution finalement, qui impacte le plus les teneurs en micronutriments.

Nous avons également observé que la teneur en lipides était plus faible dans les beignets Atadoco comparés aux beignets Ata. Cependant, en raison des fortes variabilités (mises en évidence par des analyses de variance) liées aux pratiques des productrices, l'interprétation de ces résultats s'est avérée difficile.

A l'issue de ces travaux préliminaires, deux étapes ont donc été retenues pour être étudiées en laboratoire. Il s'agit des étapes de trempage des gritz de niébé et de friture.

4.7. Compréhension des mécanismes impactant les composés d'intérêt au cours du trempage et recommandations de trempage

Nous avons réalisé une cinétique de trempage des gritz de niébé à cinq températures différentes : 5°C, 15°C, 30°C, 45°C et 60°C. Les durées de trempage étaient : 10 min, 20 min, 30 min et 60 min. Les composés analysés étaient les alpha-galactosides – raffinose, stachyose, verbascose – et la thiamine totale – thiamine monophosphate (TMP), thiamine diphosphate (TDP) et la thiamine libre –. L'étude des folates n'a pas pu être poursuivie en raison de la rupture définitive d'approvisionnement en milieu de culture utilisé pour le dosage microbiologique.

Pour l'analyse des résultats, une étape préliminaire de réalisation de bilan molaire des concentrations des composés étudiés dans l'eau de trempage et dans les gritz trempés a été réalisée afin d'évaluer les proportions de recouvrement ou de perte des teneurs initiales dans ces deux matrices (eau et gritz trempés). Cette étape a permis d'observer un recouvrement complet de la teneur initiale des alpha-galactosides totaux et de la thiamine totale dans l'eau de trempage et dans les gritz trempés (tableau 3.13). Cependant, au bout de 1h de trempage des pertes des vitamères phosphatés de la thiamine (TMP et TDP) ont été observées et attribuables à une inter-conversion en thiamine libre car une augmentation de sa teneur a été observée pour les 5 températures de trempage (figure 3.14).

Pour les alpha-galactosides, une diminution de 23% du nombre initial de moles du raffinose a été observée au niveau du couple « eau de trempage-gritz trempés » (figure 3.14). Dans le même temps, une augmentation du galactose a été observée, ce qui suggère une production de cette molécule en raison de la dégradation du raffinose qui serait due à l'activité des alpha-galactosidases. La dégradation du raffinose observée, serait due à l'activité des alpha-galactosidases. Sur des graines entières de niébé, Coffigniez et al., (2018) ont aussi observé

l'action importante des alpha-galactosidases sur le raffinose comparativement aux autres alpha-galactosides (stachyose, verbascose).

Etant donné que pour la thiamine totale nous avons un recouvrement total du nombre de moles initial et que pour les alpha-galactosides nous avons observé uniquement la dégradation du raffinose (à 60°C), nous avons jugé le phénomène de diffusion prépondérant et opté l'utilisation de modèles de diffusion. Deux modèles mathématiques empiriques ont été utilisés (ce sont des modèles d'extraction qui ont été choisis car ils sont adaptés pour étudier les phénomènes de diffusion). La modélisation a été réalisée uniquement sur les données des eaux de trempages afin d'étudier la diffusion des deux composés des gritz vers l'eau de trempage.

L'étude du phénomène de diffusion a mis en évidence une diffusion plus importante des alpha-galactosides totaux par rapport à la thiamine totale (figure 3.17). La diffusion des deux composés augmentait avec la montée en température. La figure 4.5, version simplifiée de la figure 3.7, récapitule l'ensemble des phénomènes observés dans notre étude.

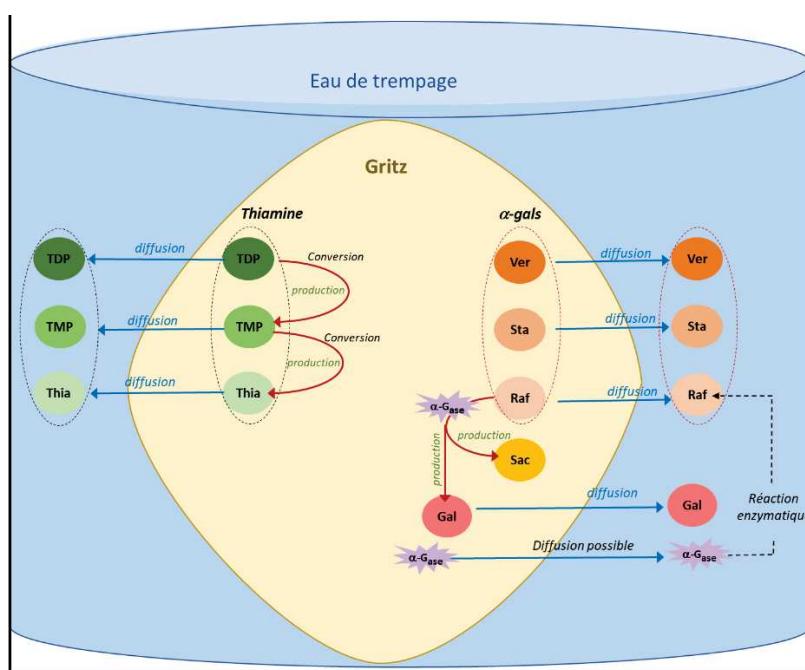


Fig 4. 5 : Mécanismes susceptibles d'influencer les teneurs en alpha-galactosides et en thiamine au cours du trempage des gritz de niébé

TDP : Thiamine disphosphate, TMP : Thiamine monophosphate, Thia : Thiamine libre, Thio : Thiochrome, α-gals : Alpha-galactosides, Ver : Verbascose, Sta : Stachyose, Raf : Raffinose, Sac : Saccharose, Gal : Galactose, α-Gase : Alpha-galactosidase, Thiaase : Thiaminase.

4.8. Identification de conditions optimales au cours de la friture des beignets

Un facteur clé de la qualité des aliments frits est la quantité d'huile absorbée, qui doit être faible (Bouchon, 2009). Concernant l'impact des paramètres étudiés sur la teneur en lipides, les résultats ont montré qu'une pâte avec une granulométrie fine favorisait une absorption d'huile plus faible. En effet, après le battage des pâtes à granulométrie grossière nous avons observé une importante incorporation d'air comparativement aux pâtes de granulométrie fine (figure 3.19). Or, les pâtes dans lesquelles il y a une forte incorporation d'air, absorbent des quantités importantes d'huile en raison des poches d'air vides générées (Singh *et al.*, 2004). De plus, Saguy *et al.*, (1998) ont rapporté que la rugosité de la surface des produits frits entraîne une augmentation de la surface d'échange et favorise une forte absorption d'huile au cours de la friture.

Notre étude a également montré qu'une faible masse de pâton entraînait une moindre incorporation d'huile dans la mie. Ceci pourrait s'expliquer par la formation rapide de la croute (qui va jouer le rôle de barrière à l'incorporation d'huile dans la mie) quand on utilise une faible masse de pâton.

Concernant la thiamine, notre étude a montré que sa teneur était très peu modifiée au cours de la friture malgré sa thermosensibilité. Ces résultats suggèrent donc que l'opération de friture des beignets de niébé permet de préserver la thiamine. Cependant, la présence d'agents modifiant le pH (comme le bicarbonate de sodium qui entraîne un pH basique) dans les pâtes pourrait entraîner une dégradation de la thiamine. En effet, au cours de l'étude des procédés traditionnels de fabrication des beignets de niébé, nous avons identifié une variante de production des beignets Ata-doco dans laquelle, le bicarbonate de sodium est utilisé comme agent levant (figure 3.4). Or dans la littérature, il a été rapporté que la thiamine est très sensible à un pH basique (Edijala, 1980b). Dans notre étude, nous n'avons pas pu étudier le degré de dégradation de la thiamine en présence d'un tel agent. Une étude pourrait être envisagée dans le futur en faisant varier la concentration de bicarbonate de sodium afin d'identifier celle permettant de limiter au maximum les pertes en thiamine.

4.9. Bénéfices nutritionnels potentiels suite à l'étude des étapes de trempage et de friture, et réponses aux attentes des consommateurs

L'étude des étapes de trempage et de friture au laboratoire nous a permis d'identifier des conditions optimales permettant d'améliorer la qualité nutritionnelle des beignets de niébé.

Pour l'étape de trempage, nous avons proposé des scénarios (30°C/120 min ou 50°C/60min ou 60°C/30 min) au cours desquels environ 50% et 30% respectivement des alpha-galactosides totaux et de la thiamine totale seraient éliminés par diffusion dans l'eau de trempage. Ces conditions favoriseraient une perte supplémentaire de 15% des alpha-galactosides totaux dans les gritz de niébé comparativement aux échantillons collectés sur le terrain. Cependant, l'application de ces itinéraires pourrait présenter des contraintes pour les productrices (longue durée ou suivi et contrôle de la température).

Pour l'étape de friture, l'utilisation de pâtes à granulométrie fine pour la préparation des beignets permettrait de réduire 53 à 68% (base humide) les teneurs en lipides des beignets par rapport aux échantillons collectés auprès des productrices. Ceci permettra de répondre à l'une des attentes « pas trop huileux » des consommateurs (figure 4.6) sur les qualités recherchées au niveau des beignets de niébé (données collectées lors d'une enquête supplémentaire auprès de 50 personnes dans chacune des trois zones de notre étude). D'autres critères les plus cités par les consommateurs étaient la croustillance et la texture (légère, beignets bien gonflés). Des études pourraient être envisagées dans le futur afin de faire une optimisation multicritère des beignets en prenant en compte à la fois les aspects organoleptiques et nutritionnels.

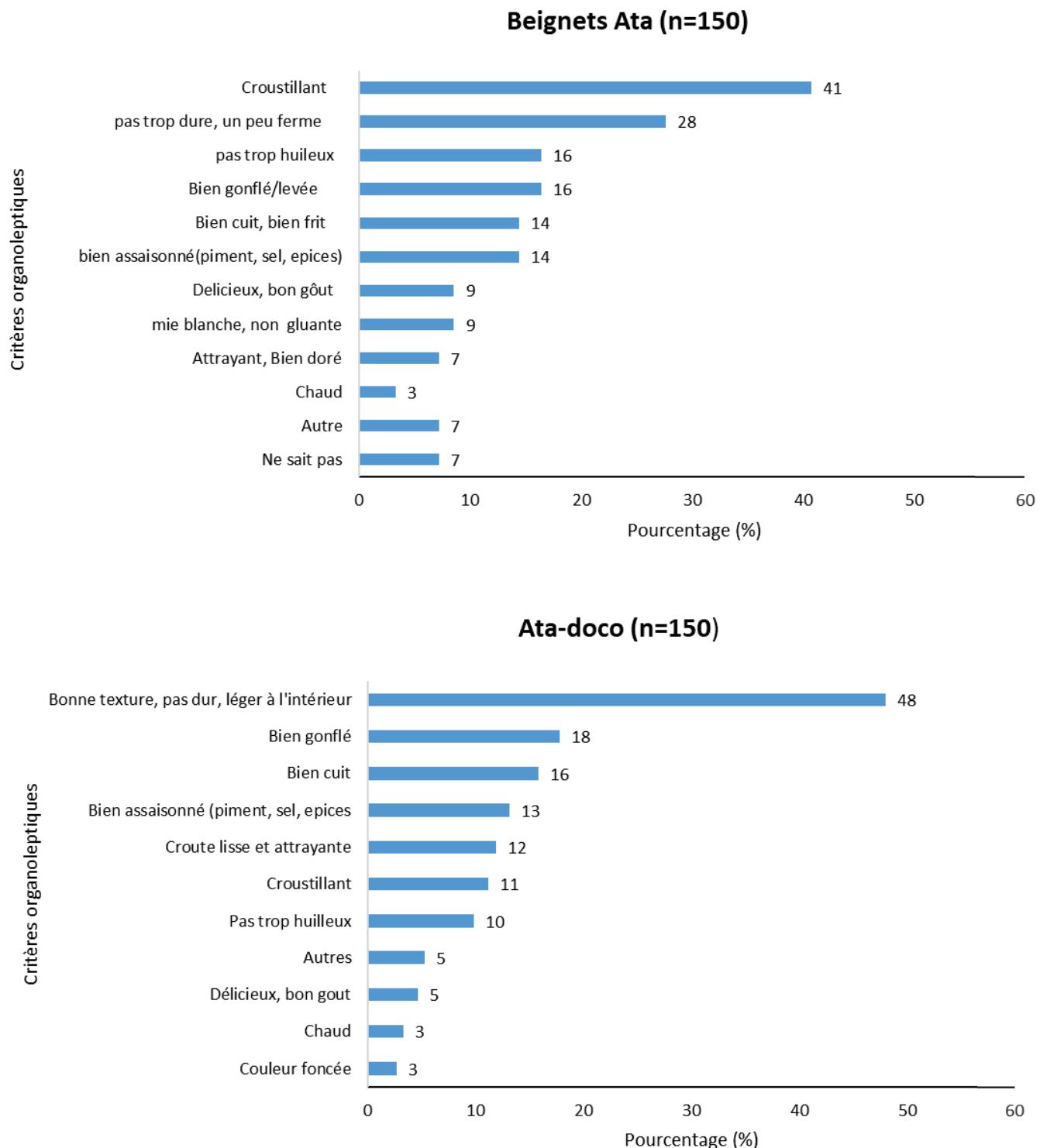


Fig 4. 6 : Qualités recherchées par les consommateurs pour les beignets Ata et Ata-doco
(Données collectées auprès de 50 personnes par zone d'étude)

Conclusion et perspectives

Conclusion générale

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse ont permis d'aboutir à des conclusions concernant l'importance de la consommation des plats traditionnels à base de niébé (*Vigna unguiculata*) pour la couverture de certains besoins nutritionnels, l'identification de facteurs pouvant influencer leur consommation, et la compréhension des mécanismes entraînant des pertes en micronutriments d'intérêt nutritionnel au cours de la préparation des beignets Ata et Ata-doco (deux plats traditionnels fréquemment consommés).

Notre étude a permis d'observer que la consommation du niébé n'a pas diminué avec l'urbanisation venant infirmer l'une de nos hypothèses initiales. En effet, les niveaux de consommations du niébé dans les zones étudiées au sud du Bénin – Cotonou (zone urbaine), Allada et Adjohoun (zones rurales) – sont très élevés, car seulement 2% de non-consommateurs ont été identifiés lors des enquêtes de fréquence de consommation. De plus, les formes de consommation sont variées, avec des tailles de portions importantes pour plusieurs d'entre elles, et des fréquences de consommation pouvant atteindre une à deux fois par semaine. Ainsi, les quantités des graines de niébé consommées observées dans cette étude étaient importantes (21-26 kg/adulte/an). Cependant, la transition alimentaire gagne davantage les zones de notre étude. En effet, certaines recettes traditionnelles tendent à disparaître au fil du temps, et la consommation de niébé s'oriente davantage vers des formes moins consistantes et plus raffinées, notamment dans la zone urbaine de Cotonou, où certains plats sont très disponibles pour la consommation hors domicile. De plus, certains participants des discussions de groupe réalisées dans notre étude, ressentent une diminution de la consommation du niébé entre les générations passées et actuelles, même si cela n'est pas encore très visible au vu des quantités consommées importantes observées dans notre étude. Il est donc important de soutenir la consommation des plats traditionnels de niébé pour éviter un déclin.

La consommation régulière des plats traditionnels à base de niébé dans les régions étudiées contribue de manière significative aux apports journaliers recommandés (AJR) en fibres (42%) en protéines (26%), en magnésium (37%), en folates (30%), pour une contribution énergétique de l'ordre de 15%. Pour le fer (10%), le calcium (7%) et la thiamine (13%), les plats à base de niébé se révèlent insuffisants, malgré ce qui a pu être rapporté dans la littérature. Notre étude a permis d'observer également que les niveaux de contribution aux AJRs augmentent avec la

diversité des plats à base de niébé consommés. Ainsi, les recettes traditionnelles doivent être préservées afin de réduire les prévalences des carences en micronutriments et de lutter contre les maladies chroniques liées à l'alimentation telles que le diabète, l'obésité et les cancers.

Les travaux réalisés dans cette thèse ont également permis d'évaluer l'impact des modes de transformation traditionnels du niébé sur la composition des plats, impact soumis à une forte variabilité en fonction des pratiques très diverses mises en œuvre par les productrices. Par exemple, pour des beignets de niébé (Ata et Ata-doco), les teneurs totales en alpha-galactosides peuvent varier de 954 à 2757¹⁰ mg/100g de beignet, et les teneurs en lipides peuvent varier de 10 à 38¹⁰ g/100g de beignet, selon les productrices. L'étude des procédés traditionnels de Ata et Ata-doco a permis d'identifier les étapes de trempage des gritz de niébé et de friture (réduction de la densité nutritionnelle des beignets) comme des opérations unitaires à améliorer en raison de leur influence sur la valeur nutritionnelle de ces deux beignets. Ainsi, l'étude en conditions contrôlées de l'étape de trempage des gritz de niébé, utilisés pour la préparation des beignets Ata, a montré des pertes en alpha-galactosides et en thiamine (vitamine B1) majoritairement liées à un phénomène diffusif. Dans certaines conditions, les pertes en alpha-galactosides observées au laboratoire (dans l'eau de trempage) étaient plus élevées que celles observées chez les productrices sur le terrain, ce qui permet d'envisager des optimisations de cette étape chez les productrices afin de réduire les teneurs en ce facteur antinutritionnel. Cette étude du trempage en conditions contrôlées a également permis d'observer une diffusion plus importante des alpha-galactosides comparativement à la thiamine, ce qui, dans le cadre d'optimisations futures, permettrait de réduire significativement les teneurs en alpha-galactosides, tout en limitant les pertes en thiamine. L'étude de l'étape de friture permet de conclure que la teneur en lipides des beignets pourrait être réduite en agissant sur la granulométrie de la pâte utilisée. En effet, une granulométrie fine favorise une plus faible absorption d'huile. Malgré la sensibilité de la thiamine (vitamine B1) à la chaleur, cette étude a permis d'observer que l'opération de friture n'entraînait pas la dégradation de cette vitamine ce qui constitue un avantage pour la couverture des besoins nutritionnels en vitamine B1.

¹⁰ Données issues de l'étude des procédés traditionnels des beignets Ata et Ata-doco.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse peuvent être directement utilisables pour des études scientifiques. En effet, les nombreuses données sur la composition des plats traditionnels à base de niébé pourront alimenter les tables de composition des aliments. Ces résultats constituent des données fiables car les plats traditionnels de niébé ont été échantillonnés auprès de différentes productrices et analysés (avec des répétitions de mesure) suivant des techniques de laboratoire standardisées et validées.

Les enquêtes réalisées ont permis de mettre en évidence les freins et les motivations à la consommation des plats traditionnels à base de niébé. Ainsi pour les acteurs locaux, ces données pourront constituer une source d'information pour concevoir des actions de sensibilisation visant à promouvoir la consommation de ces aliments traditionnels.

Les études en conditions contrôlées de l'impact nutritionnel des étapes de trempage et de friture ont généré des données pouvant être utilisées soit pour conseiller les productrices afin d'adapter leurs pratiques, soit intégrées dans une démarche de modélisation multicritère pour améliorer les procédés plus globalement.

Perspectives

- **Application opérationnelle**

Validation des essais d'optimisation du trempage et de la friture auprès de productrices locales. Cette étude était initialement prévue dans les activités de la thèse, mais n'a pas pu être effectuée notamment en raison des limitations de voyage dues à la pandémie de COVID. La réalisation de ces essais permettra de vérifier la faisabilité des recommandations technologiques.

Cette activité visera à tester sur le terrain les conditions optimales identifiées pour les étapes de trempage et de friture. Ensuite la collecte des échantillons optimisés produits par les productrices sera réalisée suivie des analyses de la composition nutritionnelle afin de vérifier l'impact de l'amélioration des procédés traditionnels des beignets sur leur valeur nutritionnelle.

Il faudrait également déterminer si les modifications proposées sont acceptables pour les productrices et quelles contraintes (difficulté d'application) génèrent ces optimisations.

L'impact de l'optimisation sur les caractéristiques organoleptiques doit être également pris en compte afin d'évaluer l'acceptabilité des beignets par les consommateurs.

Rédaction d'un livret de recettes traditionnelles de niébé. Notre étude a montré que plusieurs recettes de niébé étaient en voie de disparition et peu connues de la population. Ainsi, un document décrivant les procédés de préparation des plats à base de niébé devrait être élaboré, comme effectué dans d'autres études sur les aliments céréaliers Greffeuil et al., (2010) ou sur les légumes feuilles (Hama-Ba et al., 2015) consommés en Afrique de l'Ouest.

En appui à ce livret, des campagnes de communication pour promouvoir les plats traditionnels à base de niébé, et encourager leur consommation auprès des consommateurs et principalement les jeunes peuvent être envisagées.

- **Recherche scientifique**

Réalisation du dosage des folates sur les échantillons expérimentaux. Il faudrait développer une nouvelle méthode de dosage des folates en remplacement à la méthode microbiologique (arrêt de la commercialisation du milieu de culture initialement utilisé) afin de poursuivre les travaux sur ces composés.

Etude approfondie du comportement de la thiamine et des alpha-galactosides par modélisation mécanistique. Dans le cadre de notre étude nous avons utilisé des modèles empiriques qui ne fournissent pas d'informations sur les phénomènes de réaction (inter-conversions des vitamères de la thiamine ou dégradation du raffinose par exemple). Il faudrait donc poursuivre les travaux afin de mieux maîtriser les mécanismes se déroulant au cours du trempage des gritz de niébé.

Etude approfondie de l'étape de friture. Il faudrait poursuivre les études en étudiant de manière objective l'influence de l'incorporation de l'air (par mesure de la capacité de formation de mousse) dans les beignets sur l'absorption d'huile.

Il existe plusieurs autres facteurs (teneur et nature des fibres par exemple) permettant de réduire l'absorption d'huile au cours de la friture qui n'ont pas été pris en compte dans notre étude. Il faudrait donc envisager des études supplémentaires afin de mieux contrôler l'absorption d'huile dans les beignets de niébé.

L'impact de l'incorporation du bicarbonate de sodium dans les pâtes (utilisés pour la production des beignets Ata-doco) sur les teneurs en thiamine peut être aussi étudié.

Production de beignets à partir de graines de niébé germées. La germination des légumineuses est une opération permettant d'améliorer la qualité nutritionnelle des aliments. Par exemple, elle est utilisée comme technique pour réduire les teneurs en phytates ou en alpha-galactosides dans les graines et pour augmenter les teneurs en certaines vitamines. Ainsi, elle peut être utilisée pour le développement d'une technologie améliorée de production des beignets.

Il faudrait en parallèle prévoir des tests d'acceptabilité auprès des consommateurs.

Caractérisation nutritionnelle à poursuivre dans les plats de niébé. Plusieurs ingrédients (riz, maïs, extrait de noix de palme/huile rouge) autres que les graines de niébé sont utilisés pour la préparation de plats traditionnels de cette légumineuse. Dans notre étude, nous nous sommes principalement intéressés à la caractérisation nutritionnelle des composés d'intérêt de la graine de niébé. En effet, les autres ingrédients précédemment cités apportent d'autres nutriments qui peuvent également être étudiés afin de disposer de plus d'informations sur le potentiel nutritionnel des plats traditionnels de niébé. Etant donné que les céréales sont incorporées dans un certain nombre de plats de niébé (Atassi, Djongoli, Abla), le profil en acides aminés de ces plats peut être étudié afin de comparer les compositions de ces plats à celles d'autres aliments de niébé ne contenant pas de céréales. Des analyses peuvent s'étendre sur le dosage d'autres vitamines comme la vitamine A par exemple (car certains plats contiennent une proportion importante d'huile de palme rouge).

Notre étude a montré que les beignets de niébé étaient très consommés au Bénin. Cependant au cours de la friture d'autres composés nocifs comme l'acrylamide (composé cancérogène formé au cours de la réaction de Maillard) peuvent se former. Une étude peut donc être envisagée afin d'étudier ce composé au niveau des beignets de niébé.

Réalisation d'enquêtes de fréquences de consommation similaires sur d'autres légumineuses. Dans notre étude, nous avons observé que d'autres légumineuses sont consommées par la population avec parfois des différences entre Cotonou et les zones rurales. C'est le cas par exemple des graines de soja qui était consommée par 75% des enquêtés dans les zones rurales de notre étude contre 45% à Cotonou. On pourrait donc envisager une étude

de fréquence de consommation similaire afin d'identifier les facteurs liés à cette différence et dans le même temps évaluer la contribution nutritionnelle des aliments à base de cette légumineuse.

Références bibliographiques

- Abrahams, Z., Mchiza, Z. & Steyn, N.P. (2011). Diet and mortality rates in Sub-Saharan Africa: Stages in the nutrition transition. *BMC Public Health*, **11**.
- Adish, A.A., Esrey, S.A., Gyorkos, T.W., Jean-Baptiste, J. & Rojhani, A. (1999). Effect of consumption of food cooked in iron pots on iron status and growth of young children: a randomised trial. *Lancet*, **353**, 712–716.
- AHO, N. (1988). *Contraintes et atouts du Niébé. In Les légumineuses à graines. Fondation Internationale pour la sciences-FIS; Grev Turegatan, Stockholm, Suède, 19*, p. 3-11.
- Akibode, S. & Maredia, M. (2011). Global and Regional Trends in Production, Trade and Consumption of Food Legume Crops.
- Akinlosotu, A. & Akinyele, I.O. (1991). The effect of germination on the oligosaccharide and nutrient content of cowpeas (*Vigna unguiculata*). *Food Chemistry*, **39**, 157–165.
- Akinyele, I.O. & Akinlosotu, A. (1987). Contribution of cowpea (*Vigna unguiculata*) in a mixed diet to the nutrient intake of rural children in Ibadan. *British Journal of Nutrition*, **58**, 31–39.
- Akissoé, L., Madodé, Y.E., Hemery, Y.M., Donadjé, B.V., Icard-Vernière, C., Hounhouigan, D.J. & Mouquet-Rivier, C. (2021). Impact of traditional processing on proximate composition, folate, mineral, phytate, and alpha-galacto-oligosaccharide contents of two West African cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) based doughnuts. *Journal of Food Composition and Analysis*, **96**, 103753.
- Alani, S.R., Smith, D.M. & Markakis, P. (1990). Changes in alpha-galactosidase activity and oligosaccharides during germination and incubation of cowpeas (*Vigna unguiculata*). *Food Chemistry*, **38**, 153–158.
- Amanatidis, S., Mackerras, D. & Simpson, J.M. (2001). Comparison of two frequency questionnaires for quantifying fruit and vegetable intake. *Public Health Nutrition*, **4**, 233–239.
- Amponsou, E.O., Houssou, P.A., Sakyi-Dawson, E. & Saalia, F.K. (2009). Dehulling characteristics, sensory and functional properties of flours from selected cowpea varieties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **89**, 1587–1592.
- Amougou, N., Cohen, E., Mbala, M.L., Grosdidier, B., Bernard, J.Y., Saïd-Mohamed, R. & Pasquet, P. (2016). Development and validation of two food portion photograph books to assess dietary intake among adults and children in Central Africa. *British Journal of Nutrition*, **115**, 895–902.
- Amoussa Hounkpatin, W., Mizehoun-Adissoda, C., Lokonon, J., Tougan, U.P., Gbondje, J.L.S., Padonou, G., Houindote, A. & Bodjrenou, S. (2021). Update of the nutritional situation in Benin Republic. *The North African Journal of Food and Nutrition Research*, **04**, S116–S123.
- Amouzou, E.K., Chabi, N.W., Adjalla, C.E., Rodriguez-Guéant, R.M., Feillet, F., Villaume, C., Sanni, A. & Guéant, J.-L. (2004). High prevalence of hyperhomocysteinemia related to folate deficiency and the 677C→T mutation of the gene encoding methylenetetrahydrofolate reductase in coastal West Africa. *The American Journal of Clinical Nutrition*, **79**, 619–624.
- Andersson, A.P. & Öste, R.E. (1994). Diffusivity data of an artificial food system. *Journal of Food Engineering*, **23**, 631–639.
- ANSES. (2016). *Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles. Rapport d'expertise collective. Available at : <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-1.pdf>*.
- AOAC. (1995). *Official methods of analysis*. 16th edn. Washington DC: Association of Official Analytical Chemists International.
- AOAC. (2006). *Official methods of analysis of AOAC International*. 18. ed., current through rev. 1, 2006. Gaithersburg, Md: AOAC International.
- Arabshahi, A. & Lund, D.B. (1988). Thiamin Stability in Simulated Intermediate Moisture Food. *Journal of Food Science*, **53**, 199–203.
- Arcot, J., Wong, S. & Shrestha, A.K. (2002). Comparison of folate losses in soybean during the preparation of tempeh and soymilk. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **82**, 1365–1368.
- Arnoldi, A., Zanoni, C., Lammi, C. & Boschin, G. (2015). The Role of Grain Legumes in the Prevention of Hypercholesterolemia and Hypertension. *Critical Reviews in Plant Sciences*, **34**, 144–168.
- Aruna, T. & Devindra, S. (2016). Nutritional and Anti-Nutritional Characteristics of Two Varieties of Red gram (*Cajanus cajan*, L.) Seeds, **6**, 6.
- Asare, A.T., Agbemafle, R., Adukpo, G.E., Diabor, E. & Adamtey, K.A. (2013). Assessment of functional properties and nutritional composition of some cowpea (*Vigna unguiculata* l.) genotypes in ghana, **8**, 5.
- Asokapandian, S., Swamy, G.J. & Hajjul, H. (2020). Deep fat frying of foods: A critical review on process and product parameters. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **60**, 3400–3413.

- Ávila, B.P., Santos dos Santos, M., Nicoletti, A.M., Alves, G.D., Elias, M.C., Monks, J. & Gularate, M.A. (2015). Impact of Different Salts in Soaking Water on the Cooking Time, Texture and Physical Parameters of Cowpeas. *Plant Foods for Human Nutrition*, **70**, 463–469.
- Awika, J.M. & Duodu, K.G. (2017). Bioactive polyphenols and peptides in cowpea (*Vigna unguiculata*) and their health promoting properties: A review. *Journal of Functional Foods*, Special issue on pulses, **38**, 686–697.
- Barnard, N.D., Cohen, J., Jenkins, D.J., Turner-McGrievy, G., Gloede, L., Green, A. & Ferdowsian, H. (2009). A low-fat vegan diet and a conventional diabetes diet in the treatment of type 2 diabetes: a randomized, controlled, 74-wk clinical trial. *The American Journal of Clinical Nutrition*, **89**, 1588S-1596S.
- Bationo, F., Humblot, C., Songré-Ouattara, L.T., Hama-Ba, F., Le Merrer, M., Chapron, M., Kariluoto, S. & Hemery, Y.M. (2020). Total folate in West African cereal-based fermented foods: Bioaccessibility and influence of processing. *Journal of Food Composition and Analysis*, **85**, 103309.
- Bationo, F., Songré-Ouattara, L.T., Hama-Ba, F., Baye, K., Hemery, Y.M., Parkouda, C., Lingani-Sawadogo, H., Diawara, B. & Humblot, C. (2019a). Folate Status of Women and Children in Africa – Current Situation and Improvement Strategies. *Food Reviews International*, 1–14.
- Bationo, F., Songré-Ouattara, L.T., Hemery, Y.M., Hama-Ba, F., Parkouda, C., Chapron, M., Le Merrer, M., Leconte, N., Sawadogo-Lingani, H., Diawara, B. & Humblot, C. (2019b). Improved processing for the production of cereal-based fermented porridge enriched in folate using selected lactic acid bacteria and a back slopping process. *LWT*, **106**, 172–178.
- Bazzano, L.A., Thompson, A.M., Tees, M.T., Nguyen, C.H. & Winham, D.M. (2011). Non-soy legume consumption lowers cholesterol levels: A meta-analysis of randomized controlled trials. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, **21**, 94–103.
- Bertinato, J. (2017). Magnesium Deficiency: Prevalence, Assessment, and Physiological Effects. In: *Handbook of Famine, Starvation, and Nutrient Deprivation: From Biology to Policy* (edited by V. Preedy & V.B. Patel). Pp. 1–21. Cham: Springer International Publishing.
- Bettendorff, L. (2013). The Chemistry, Biochemistry and Metabolism of Thiamin (Vitamin B1). *The Royal Society of Chemistry*.
- Bimbenet, J.-J., Duquenoy, A. & Trystram, G. (2002). *Génie des procédés alimentaires : des bases aux applications / ouvrage coordonné par Jean-Jacques Bimbenet, Albert Duquenoy, Gilles Trystram ; préfaces de Daniel Genton et de Jean-Claude Charpentier*. Technique et ingénierie Série Agroalimentaire. Paris: Dunod RIA Editions.
- Blakley, R.L. (1987). Nomenclature and symbols for folic acid and related compounds. *European Journal of Biochemistry*, **168**, 251–253.
- Bland, M.J. & Altman, DouglasG. (1986). STATISTICAL METHODS FOR ASSESSING AGREEMENT BETWEEN TWO METHODS OF CLINICAL MEASUREMENT. *The Lancet*, Originally published as Volume 1, Issue 8476, **327**, 307–310.
- Bouchon, P. (2009). Chapter 5 Understanding Oil Absorption During Deep-Fat Frying. In: *Advances in Food and Nutrition Research*. Pp. 209–234. Elsevier.
- Bovell-Benjamin, A.C., Dawkin, N., Pace, R.D. & Shikany, J.M. (2009). Use of focus groups to understand African-Americans' dietary practices: Implications for modifying a food frequency questionnaire. *Preventive medicine*, **48**, 549–554.
- Boye, J., Zare, F. & Pletch, A. (2010). Pulse proteins: Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed. *Food Research International*, **43**, 414–431.
- Bricas, N., Tchamda, C. & Mouton, F. (2016). L'Afrique à la conquête de son marché alimentaire intérieur. Enseignements de dix ans d'enquêtes auprès des ménages d'Afrique de l'Ouest, au Cameroun et du Tchad, 136.
- Briffaz, A. (2013). *Étude expérimentale et modélisation des transferts de matière couplés aux transitions thermiques de l'amidon au cours de la cuisson du riz*.
- Buch-Andersen, T., Pérez-Cueto, F.J. & Toft, U. (2016). Relative validity and reproducibility of a parent-administered semi-quantitative FFQ for assessing food intake in Danish children aged 3–9 years. *Public Health Nutrition*, **19**, 1184–1194.
- Bulgarelli, M.A., Beuchat, L.R. & McWATTERS, K.H. (1988). Microbiological Quality of Cowpea Paste Used to Prepare Nigerian Akara. *Journal of Food Science*, **53**, 442–442.
- Butterworth, C.E., Baugh, C.M. & Krumdieck, C. (1969). A study of folate absorption and metabolism in man utilizing carbon-14-labeled polyglutamates synthesized by the solid phase method. *The Journal of Clinical Investigation*, **48**, 1131–1142.

- Cade, J.* , Thompson, R., Burley, V. & Warm, D. (2002). Development, validation and utilisation of food-frequency questionnaires – a review. *Public Health Nutrition*, **5**, 567–587.
- Çakir, Ö., Uçarlı, C., Tarhan, Ç., Pekmez, M. & Turgut-Kara, N. (2019). Nutritional and health benefits of legumes and their distinctive genomic properties. *Food Science and Technology*, **39**, 1–12.
- Carvalho, M., Lino-Neto, T., Rosa, E. & Carnide, V. (2017). Cowpea: a legume crop for a challenging environment: Cowpea for a challenging environment. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **97**, 4273–4284.
- Chaparro, C.M. & Suchdev, P.S. (2019). Anemia epidemiology, pathophysiology, and etiology in low- and middle-income countries. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **1450**, 15–31.
- Cheryan, M. & Rackis, J.J. (1980). Phytic acid interactions in food systems. *C R C Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **13**, 297–335.
- Chickwendu, N.J. (2007). Chemical composition of four varieties of groundbean (*Kerstingiella geocarpa*), **6**, 79–84.
- Chigwedere, C.M., Njoroge, D.M., Loey, A.M. & Hendrickx, M.E. (2019). Understanding the Relations Among the Storage, Soaking, and Cooking Behavior of Pulses: A Scientific Basis for Innovations in Sustainable Foods for the Future. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **18**, 1135–1165.
- Chikubu, S., Horiuchi, H., Furuya, M. & Niizeki, S. (1956). Studies on the distribution of thiamine in the seed and seedling of kidney bean by the photographic method. *THE JOURNAL OF VITAMINOLOGY*, **2**, 257–263.
- Clancey, B. (2009). *World Pulse Outlook: Report to the Saskatchewan Pulse Growers*.
- Codex. (1997). *Guidelines for use of nutrition and health claims. Revised in 2004. Amended in 2001, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012 and 2013. (No. CAC/GL 23-1997)*.
- Coffigniez, F. (2018). *Compréhension du devenir des alpha-galactosides et folates lors de l'opération de trempage-cuisson du niébé*.
- Coffigniez, F., Briffaz, A., Mestres, C., Akissoé, L., Bohuon, P. & El Maâtaoui, M. (2019a). Impact of soaking process on the microstructure of cowpea seeds in relation to solid losses and water absorption. *Food Research International*, **119**, 268–275.
- Coffigniez, F., Briffaz, A., Mestres, C., Alter, P., Noel, D. & Bohuon, P. (2018a). Multi-response modeling of reaction-diffusion to explain alpha-galactoside behavior during the soaking-cooking process in cowpea. *Food Chemistry*, **242**, 279–287.
- Coffigniez, F., Briffaz, A., Mestres, C., Ricci, J., Alter, P., Noel, D. & Bohuon, P. (2018b). Kinetic study of enzymatic α-galactoside hydrolysis in cowpea seeds. *Food Research International*, **113**.
- Coffigniez, F., Rychlik, M., Sanier, C., Mestres, C., Striegel, L., Bohuon, P. & Briffaz, A. (2019b). Localization and modeling of reaction and diffusion to explain folate behavior during soaking of cowpea. *Journal of Food Engineering*, **253**, 49–58.
- Corradini, M.G. & Peleg, M. (2004). A model of non-isothermal degradation of nutrients, pigments and enzymes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **84**, 217–226.
- Coulibaly, A., Turgeon O'Brien, H. & Galibois, I. (2009). Validation of an FFQ to assess dietary protein intake in type 2 diabetic subjects attending primary health-care services in Mali. *Public Health Nutrition*, **12**, 644–650.
- Cruz, J.-F., Joseph Hounhouigan, D., Fleurat-Lessard, F. & Troude, F. (2016). *La conservation des grains après récolte*. éditions Quae.
- Czeizel, A., Dudás, I., Vereczkey, A. & Bánhid, F. (2013). Folate Deficiency and Folic Acid Supplementation: The Prevention of Neural-Tube Defects and Congenital Heart Defects. *Nutrients*, **5**, 4760–4775.
- Dakora, F.D. & Belane, A.K. (2019). Evaluation of Protein and Micronutrient Levels in Edible Cowpea (*Vigna Unguiculata* L. Walp.) Leaves and Seeds. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, **3**.
- Dana, D. & Saguy, I.S. (2006). Review: Mechanism of oil uptake during deep-fat frying and the surfactant effect-theory and myth. *Advances in Colloid and Interface Science*, **128–130**, 267–272.
- Dang, J. (2000). Folate retention in selected processed legumes. *Food Chemistry*, **68**, 295–298.
- Dehghan, M., Martinez, S., Zhang, X., Seron, P., Lanas, F., Islam, S. & Merchant, A.T. (2013). Relative validity of an FFQ to estimate daily food and nutrient intakes for Chilean adults. *Public Health Nutrition*, **16**, 1782–1788.
- Delchier, N., Herbig, A.-L., Rychlik, M. & Renard, C.M.G.C. (2016a). Folate in Fruits and Vegetables: Contents, Processing, and Stability. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **15**, 506–528.
- Delchier, N., Herbig, A.-L., Rychlik, M. & Renard, C.M.G.C. (2016b). Folate in Fruits and Vegetables: Contents, Processing, and Stability. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **15**, 506–528.
- Delchier, N., Ringling, C., Cuvelier, M.-E., Courtois, F., Rychlik, M. & Renard, C.M.G.C. (2014). Thermal degradation of folates under varying oxygen conditions. *Food Chemistry*, **165**, 85–91.

- Delisle, H., Ntandou-Bouzitou, G., Agueh, V., Sodjinou, R. & Fayomi, B. (2012). Urbanisation, nutrition transition and cardiometabolic risk: the Benin study. *British Journal of Nutrition*, **107**, 1534–1544.
- Devindra, S. & Aruna, T. (2017). Effect of Chemical Soaking, Toasting and Crude α -Galactosidase Enzyme Treatment on the Oligosaccharide Content of Red Gram Flour. *Journal of Food Processing and Preservation*, **41**, e12922.
- Dey, P.M. & Pridham, J.B. (1969). Substrate Specificity and Kinetic Properties of α -Galactosidases from *Vicia faba*. *Biochemical Journal*, **115**, 47–54.
- Dilis, V. & Trichopoulou, A. (2009). Nutritional and health properties of pulses. *Mediterranean Journal of Nutrition and Metabolism*, **1**, 149–157.
- Dossou, S.A.R., Aoudji, A.K.N. & Adégbidi, A. (2017). Processing of local agricultural products to meet urban demand: Lessons from soybean cheese consumption analysis in Southern Benin. *African Journal of Marketing Management*, **9**, 133–143.
- Dovlo, F.E. (Food R.I., Williams, C.E. (University of I. (Nigeria) D. of A.E. and E. & Zoaka, L. (Ministry of N.R. (1976). *Cowpeas; home preparation and use in West Africa*. International Development Research Centre.
- Duodu, K.G. & Apea-Bah, F.B. (2017). Chapter 9 - African Legumes: Nutritional and Health-Promoting Attributes. In: *Gluten-Free Ancient Grains*, Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition (edited by J.R.N. Taylor & J.M. Awika). Pp. 223–269. Woodhead Publishing.
- Dwivedi, B.K. & Arnold, R.G. (1973). Chemistry of thiamine degradation on food products and model systems. Review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **21**, 54–60.
- Eashwarage, I.S., Herath, H.M.T. & Gunathilake, K.G.T. (2017). Dietary fibre, resistant starch and in-vitro starch digestibility of selected eleven commonly consumed legumes (Mung bean, Cowpea, Soybean and Horse Gram) in Sri Lanka, **7**, 7.
- Edijala, J.K. (1980a). Effects of processing on the thiamin, riboflavin and protein contents of cowpeas (*Vigna unguiculata* (L) Walp). I. Soaking, cooking and wet milling processes. *International Journal of Food Science & Technology*, **15**, 435–443.
- Edijala, J.K. (1980b). Effects of processing on the thiamin, riboflavin and protein contents of cowpeas (*Vigna unguiculata* (L) Walp) II. Alkali ('potash') treatment. *International Journal of Food Science & Technology*, **15**, 445–453.
- Egounlety, M. & Aworh, O.C. (2003). Effect of soaking, dehulling, cooking and fermentation with *Rhizopus oligosporus* on the oligosaccharides, trypsin inhibitor, phytic acid and tannins of soybean (*Glycine max* Merr.), cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and groundbean (*Macrotyloma geocarpa* Harms). *Journal of Food Engineering*, **56**, 249–254.
- Eichner, E.R., Pierce, H.I. & Hillman, R.S. (1971). Folate Balance in Dietary-Induced Megaloblastic Anemia. *New England Journal of Medicine*, **284**, 933–938.
- Eitenmiller, R.R., Jr, W.O.L. & Ye, L. (2016). *Vitamin Analysis for the Health and Food Sciences*. CRC Press.
- Elshourbagy, N.A., Meyers, H.V. & Abdel-Meguid, S.S. (2014). Cholesterol: The Good, the Bad, and the Ugly – Therapeutic Targets for the Treatment of Dyslipidemia. *Medical Principles and Practice*, **23**, 99–111.
- FAO (Ed.). (2003). *Food energy: methods of analysis and conversion factors: report of a technical workshop, Rome, 3-6 December 2002*. Available at: http://www.fao.org/uploads/media/FAO_2003_Food_Energy_02.pdf.
- FAO food and nutrition paper. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2012). West African Food Composition Table - Table de composition des aliments d'Afrique de l'Ouest, 171.
- FAO. (2015). Food-based dietary guidelines - Benin [Internet document]. *Food and Agriculture Organization of the United Nations* URL <http://www.fao.org/nutrition/education/food-dietary-guidelines/regions/benin/en/>. Accessed 02/04/2021.
- FAO. (2016). *Pulses are praised for their health, environmental and economic benefits. How can their full potential be tapped?* Retrieved from <http://www.fao.org/fsnforum/activities/discussions/pulses> [Google Scholar].
- FAO. (2018). *Dietary assessment: a resource guide to method selection and application in low resource settings*.
- FAO. (2020). *Table de composition des aliments FAO/INFOODS pour l'Afrique de l'Ouest* (2019). Rome, Italy.
- FAO & WHO (Eds.). (2004). *Vitamin and mineral requirements in human nutrition*. 2. ed. Available at: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/42716/9241546123.pdf>. Geneva.
- FAO & WHO (Eds.). (2007). *Protein and amino acid requirements in human nutrition. Report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation (WHO Technical Report Series 935)*. Available at: https://www.who.int/nutrition/publications/nutrientrequirements/WHO_TRS_935/en/. WHO technical report series. Geneva: WHO.

- FAO/WHO. (2002). *Thiamin, riboflavin, niacin, vitamin B6, pantothenic acid and biotin*. In: *Human Vitamin and Mineral Requirements* (No. Report of a Joint FAO/WHO Expert Consultation. FAO.). Rome.
- Farinu, A. & Baik, O.-D. (2005). Deep Fat Frying Of Foods—Transport Phenomena. *Food Reviews International*, **21**, 389–410.
- Farkas, B.E., Singh, R.P. & Rurnsey, T.R. (1996). Modeling Heat and Mass transfer in Immersion Frying. I, Model Development, **29**, 16.
- Feitosa, S., Korn, M. das, Pinelli, M., Oliveira, T., Boffo, E., Greiner, R. & Almeida, D. (2015). Content of Minerals and Antinutritional Factors in Akara (Fried Cowpea Food). *International Journal of Food Processing Technology*, **2**, 42–50.
- Figueira, N., Curtain, F., Beck, E. & Grafenauer, S. (2019). Consumer Understanding and Culinary Use of Legumes in Australia. *Nutrients*, **11**, 1575.
- Fillion, L. & Henry, C.J.K. (1998). Nutrient losses and gains during frying: a review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, **49**, 157–168.
- Finglas, P.M. & Faulks, R.M. (1984). The HPLC analysis of thiamin and riboflavin in potatoes. *Food Chemistry*, **15**, 37–44.
- Galbete, C., Nicolaou, M., Meeks, K.A., Aikins, A. de-Graft, Addo, J., Amoah, S.K., Smeeth, L., Owusu-Dabo, E., Klipstein-Grobusch, K., Bahendeka, S., Agyemang, C., Mockenhaupt, F.P., Beune, E.J., Stronks, K., Schulze, M.B. & Danquah, I. (2017). Food consumption, nutrient intake, and dietary patterns in Ghanaian migrants in Europe and their compatriots in Ghana. *Food & Nutrition Research*, **61**.
- Gandonou, E., Chogou, S.K. & Mitchikpe, E. (2019). Mesure et profil de l'insécurité alimentaire individuelle au Bénin : une approche en termes de consommation d'énergie et de protéines. *Revue Internationale des Sciences Appliquées*, **2**, 34–47.
- Gbaguidi, A.A., Adjatin, A., Dansi, A. & Agbangla, C. (2015). Diversity of Cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) Landraces in Central and Northern Benin, 18.
- Ghidurus, M., Turtoi, M., Boskou, G., Niculita, P. & Stan, V. (2010). Nutritional and health aspects related to frying (I). *Romanian Biotechnological Letters*, **15**, 8.
- Global nutrition report. (2020). Country Nutrition Profiles [Internet document] URL <https://globalnutritionreport.org/resources/nutrition-profiles/africa/western-africa/benin/>. Accessed 07/03/2021.
- Gómez, C. & Mejía, D. (2004). *COWPEA: Post-Harvest Operations*. Rome, Italy: FAO.
- Gonçalves, A., Goufo, P., Barros, A., Domínguez-Perles, R., Trindade, H., Rosa, E.A.S., Ferreira, L. & Rodrigues, M. (2016). Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp), a renewed multipurpose crop for a more sustainable agri-food system: nutritional advantages and constraints. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **96**, 2941–2951.
- Goyer, A. (2010). Thiamine in plants: Aspects of its metabolism and functions. *Phytochemistry*, **71**, 1615–1624.
- Graf, E., Empson, K.L. & Eaton, J.W. (1987). Phytic acid. A natural antioxidant. *Journal of Biological Chemistry*, **262**, 11647–11650.
- Greffeuille, V., Mouquet-Rivier, C., Icard-Vernière, C., Ouattara, L., Avallone, S., Hounhouigan, D.J., Kayodé, A.P.P., Amoussa Hounkpatin, W. & Hama-Ba, F. (2010). *Greffeuille V and Mouquet-Rivier C (Eds), Icard-Vernière C, Ouattara L, Avallone S, Hounhouigan J., Kayodé P., Amoussa W., Fatoumata B.H., 2010. Traditional recipes of millet-, sorghum- and maize-based dishes and related sauces frequently consumed by young children in Burkina Faso and Benin – European Project INSTAPA, ISBN-number: 978-90-8585-903-3. Wageningen University Publisher, The Netherlands*, 136p.
- Greffeuille, V., Polycarpe Kayodé, A.P., Icard-Vernière, C., Gnimadi, M., Rochette, I. & Mouquet-Rivier, C. (2011). Changes in iron, zinc and chelating agents during traditional African processing of maize: Effect of iron contamination on bioaccessibility. *Food Chemistry*, **126**, 1800–1807.
- Gregory, J. (2008). In *Fennema's Food chemistry 4th edition*.
- Greiner, R. & Konietzny, U. (1999). Improving enzymatic reduction of myo-inositol phosphates with inhibitory effects on mineral absorption in black beans (*Phaseolus vulgaris* var. *preto*). *Journal of Food Processing and Preservation*, **23**, 249–261.
- Guwatudde, D., Nankya-Mutyoba, J., Kalyesubula, R., Laurence, C., Adebamowo, C., Ajayi, I., Bajunirwe, F., Njelekela, M., Chiwanga, F.S., Reid, T., Volmink, J., Adami, H.-O., Holmes, M.D. & Dalal, S. (2015). The burden of hypertension in sub-Saharan Africa: a four-country cross sectional study. *BMC Public Health*, **15**, 1211.
- Ha, V., Sievenpiper, J.L., Souza, R.J. de, Jayalath, V.H., Mirrahimi, A., Agarwal, A., Chiavaroli, L., Mejia, S.B., Sacks, F.M., Di Buono, M., Bernstein, A.M., Leiter, L.A., Kris-Etherton, P.M., Vuksan, V., Bazinet, R.P., Josse,

- R.G., Beyene, J., Kendall, C.W.C. & Jenkins, D.J.A. (2014). Effect of dietary pulse intake on established therapeutic lipid targets for cardiovascular risk reduction: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Canadian Medical Association Journal*, **186**, E252–E262.
- Hama-Ba, F., Mouquet-Rivier, C., Diawara, B., Weltzien, E. & Icard-Vernière, C. (2019). Traditional African Dishes Prepared From Local Biofortified Varieties of Pearl Millet: Acceptability and Potential Contribution to Iron and Zinc Intakes of Burkinabe Young Children. *Frontiers in Nutrition*, **6**.
- Hama-Ba, F., Parkouda, C., Kamga, R., Tenkouano, A. & Ont, B. (2015). *Légumes traditionnels Africains Livret de recettes à base de quelques légumes traditionnels africains fréquemment consommés au Burkina Faso*.
- Harmankaya, M., Ceyhan, E., Çelik, A.S., Sert, H., Kahraman, A. & Özcan, M.M. (2016). Some chemical properties, mineral content and amino acid composition of cowpeas (*Vigna sinensis* (L.) Savi). *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, **8**, 111–116.
- Harvey-Leeson, S., Karakochuk, C., Hawes, M., Tugirimana, P., Bahizire, E., Akilimali, P., Michaux, K., Lynd, L., Whitfield, K., Moursi, M., Boy, E., Foley, J., McLean, J., Houghton, L., Gibson, R. & Green, T. (2016). Anemia and Micronutrient Status of Women of Childbearing Age and Children 6–59 Months in the Democratic Republic of the Congo. *Nutrients*, **8**, 98.
- Hawkes, J.G. & Villota, R. (1989). Folates in foods: reactivity, stability during processing, and nutritional implications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **28**, 439–538.
- Henshaw, F.O. (2008). Varietal Differences in Physical Characteristics and Proximate Composition of Cowpea (*Vigna unguiculata*), 5.
- Henshaw, F.O., Uzochukwu, S.V.A. & Bello, I.Y. (2000). Sensory properties of akara (fried cowpea paste) prepared from paste stored at low storage temperatures. *International Journal of Food Properties*, **3**, 295–304.
- Holmes, M.D., Dalal, S., Sewram, V., Diamond, M.B., Adebamowo, S.N., Ajayi, I.O., Adebamowo, C., Chiwanga, F.S., Njelekelwa, M., Laurence, C., Volmink, J., Bajunirwe, F., Nankya-Mutyoba, J., Guwatudde, D., Reid, T.G., Willett, W.C., Adami, H.-O. & Fung, T.T. (2018). Consumption of processed food dietary patterns in four African populations. *Public Health Nutrition*, **21**, 1529–1537.
- Hoppner, K. & Lampi, B. (1993). Folate retention in dried legumes after different methods of meal preparation. *Food Research International*, **26**, 45–48.
- Hosseinpour-Niazi, S., Mirmiran, P., Hedayati, M. & Azizi, F. (2015). Substitution of red meat with legumes in the therapeutic lifestyle change diet based on dietary advice improves cardiometabolic risk factors in overweight type 2 diabetes patients: a cross-over randomized clinical trial. *European Journal of Clinical Nutrition*, **69**, 592–597.
- Houssou, A., Ahohuendo, B., Fandohan, P. & Hounhouigan, D. (2011). Analysis of pre- and post-harvest practices of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) in Benin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **4**.
- Hsieh, H.-F. & Shannon, S.E. (2005). Three Approaches to Qualitative Content Analysis. *Qualitative Health Research*, **15**, 1277–1288.
- Hung, Y.-C., McWatters, K.H., Phillips, R.D., Beuchat, L.R. & Chinnan, M.S. (2002). Physicochemical, Microbiological, and Akara-Making Properties of Hard-To-Cook Cowpeas.
- Icard-Vernière, C., Hama, F., Guyot, J.-P., Picq, C., Diawara, B. & Mouquet-Rivier, C. (2013). Iron Contamination during In-Field Milling of Millet and Sorghum. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **61**, 10377–10383.
- INSAE. (2019). INSAE - Statistiques Agricoles [Internet document] URL <https://insae.bj/statistiques/statistiques-agricoles>. Accessed 04/02/2021.
- INSAE & ICF. (2019). *Enquête Démographique et de Santé au Bénin, 2017-2018*. Cotonou, Bénin et Rockville, Maryland, USA : INSAE et ICF.
- Institute of Medicine (U.S.), Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference Intakes, Institute of Medicine (U.S.), Panel on Folate, O.B.V., and Choline, Institute of Medicine (U.S.) & Subcommittee on Upper Reference Levels of Nutrients. (1998). *Dietary Reference Intakes for Thiamin, Riboflavin, Niacin, Vitamin B6, Folate, Vitamin B12, Pantothenic Acid, Biotin, and Choline*. National Academies Press.
- Jayalath, V.H., Souza, R.J. de, Sievenpiper, J.L., Ha, V., Chiavaroli, L., Mirrahimi, A., Di Buono, M., Bernstein, A.M., Leiter, L.A., Kris-Etherton, P.M., Vuksan, V., Beyene, J., Kendall, C.W.C. & Jenkins, D.J.A. (2014). Effect of Dietary Pulses on Blood Pressure: A Systematic Review and Meta-analysis of Controlled Feeding Trials. *American Journal of Hypertension*, **27**, 56–64.

- Jayathilake, C., Visvanathan, R., Deen, A., Bangamuwage, R., Jayawardana, B.C., Nammi, S. & Liyanage, R. (2018). Cowpea: an overview on its nutritional facts and health benefits: Nutritional and health properties of cowpea. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **98**, 4793–4806.
- Jenkins, D.J.A., Kendall, C.W.C., Augustin, L.S.A., Mitchell, S., Sahye-Pudaruth, S., Blanco Mejia, S., Chiavaroli, L., Mirrahimi, A., Ireland, C., Bashyam, B., Vidgen, E., Souza, R.J. de, Sievenpiper, J.L., Coveney, J., Leiter, L.A. & Josse, R.G. (2012). Effect of Legumes as Part of a Low Glycemic Index Diet on Glycemic Control and Cardiovascular Risk Factors in Type 2 Diabetes Mellitus: A Randomized Controlled Trial. *Archives of Internal Medicine*, **172**, 1653.
- Johnson, R.K. (2002). Dietary Intake—How Do We Measure What People Are Really Eating? *Obesity Research*, **10**, 63S-68S.
- Jones, A.D. & Ejeta, G. (2016). A new global agenda for nutrition and health: the importance of agriculture and food systems. *Bulletin of the World Health Organization*, **94**, 228–229.
- Jonnala, R.S., Dunford, N.T. & Chenault, K. (2006). Nutritional Composition of Genetically Modified Peanut Varieties. *Journal of Food Science*, **70**, S254–S256.
- Kaptso, K.G., Njintang, Y.N., Komnek, A.E., Hounhouigan, J., Scher, J. & Mbofung, C.M.F. (2008). Physical properties and rehydration kinetics of two varieties of cowpea (*Vigna unguiculata*) and bambara groundnuts (*Voandzeia subterranea*) seeds. *Journal of Food Engineering*, **86**, 91–99.
- Kariluoto, S., Aittamaa, M., Korhola, M., Salovaara, H., Vahteristo, L. & Piironen, V. (2006a). Effects of yeasts and bacteria on the levels of folates in rye sourdoughs. *International Journal of Food Microbiology*, **106**, 137–143.
- Kariluoto, S., Liukkonen, K.-H., Myllymäki, O., Vahteristo, L., Kaukovirta-Norja, A. & Piironen, V. (2006b). Effect of Germination and Thermal Treatments on Folates in Rye. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **54**, 9522–9528.
- Kariluoto, S. & Piironen, V. (2009). Total folate. In: Shewry, P.R., Ward, J.L. (Eds.), *HEALTHGRAIN Methods, Analysis of Bioactive Components in Small Grain Cereals*. AACC International. Pp. 59–68. St Paul, Minnesota, USA,.
- Kariluoto, S., Vahteristo, L., Salovaara, H., Katina, K., Liukkonen, K.-H. & Piironen, V. (2004). Effect of Baking Method and Fermentation on Folate Content of Rye and Wheat Breads. *Cereal Chemistry*, **81**, 134–139.
- Kerr, W.L., Ward, C.D.W., McWatters, K.H. & Resurreccion, A.V.A. (2000). Effect of Milling and Particle Size on Functionality and Physicochemical Properties of Cowpea Flour. *Cereal Chemistry Journal*, **77**, 213–219.
- Kethireddipalli, P., Hung, Y.-C., Mcwatters, K.H. & Phillips, R.D. (2002a). Effect of Milling Method (Wet and Dry) on the Functional Properties of Cowpea (*Vigna unguiculata*) Pastes and End Product (Akara) Quality. *Journal of Food Science*, **67**, 48–52.
- Kethireddipalli, P., Hung, Y.-C., Phillips, R.D. & Mcwatters, K.H. (2002b). Evaluating the Role of Cell Wall Material and Soluble Protein in the Functionality of Cowpea (*Vigna unguiculata*) Pastes. *Journal of Food Science*, **67**, 53–59.
- Kim, S.J., Souza, R.J. de, Choo, V.L., Ha, V., Cozma, A.I., Chiavaroli, L., Mirrahimi, A., Blanco Mejia, S., Di Buono, M., Bernstein, A.M., Leiter, L.A., Kris-Etherton, P.M., Vuksan, V., Beyene, J., Kendall, C.W., Jenkins, D.J. & Sievenpiper, J.L. (2016). Effects of dietary pulse consumption on body weight: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *The American Journal of Clinical Nutrition*, **103**, 1213–1223.
- Kleef, E. van, Trijp, H.C.M. van & Luning, P. (2005). Consumer research in the early stages of new product development: a critical review of methods and techniques. *Food Quality and Preference*, **16**, 181–201.
- Koehler, P., Hartmann, G., Wieser, H. & Rychlik, M. (2007). Changes of Folates, Dietary Fiber, and Proteins in Wheat As Affected by Germination, 6.
- Kossou, D.K., Gbèhounou, G., Ahanchédé, A., Ahohuendo, B., Bouraïma, Y. & Huis, A. van. (2001). Indigenous cowpea production and protection practices in Benin. *International Journal of Tropical Insect Science*, **21**, 123–132.
- Kozempel, M.F., Sullivan, J.F., Monica, E.S.D., Egoville, M.J., Talley, E.A., Jones, W.J. & Craig, J.C. (1982). Application of Leaching Model to Describe Potato Nutrient Losses in Hot Water Blanching. *Journal of Food Science*, **47**, 1519–1523.
- Kritikos, G. (2017). Thiamine Concentrations in Extruded Dog and Cat Food & Determination of Thiamine Status in Healthy Dogs and Cats and Comparison with Hospitalized Inappetent Animals [Internet document]. *undefinedURL* /paper/Thiamine-Concentrations-in-Extruded-Dog-and-Cat-%26-Kritikos/79e017117fd22b74f76f6853fdd1942b5d08c583. Accessed 03/03/2021.

- Kumssa, D.B., Joy, E.J.M., Ander, E.L., Watts, M.J., Young, S.D., Walker, S. & Broadley, M.R. (2015). Dietary calcium and zinc deficiency risks are decreasing but remain prevalent. *Scientific Reports*, **5**, 10974.
- Langyintuo, A.S., Lowenberg-DeBoer, J., Faye, M., Lambert, D., Ibro, G., Moussa, B., Kergna, A., Kushwaha, S., Musa, S. & Ntoukam, G. (2003). Cowpea supply and demand in West and Central Africa. *Field Crops Research*, **82**, 215–231.
- Lanham-New, S.A., Hill, T.R., Gallagher, A.M. & Vorster, H.H. (2019). *Introduction to Human Nutrition*. John Wiley & Sons.
- Lea, E., Worsley, A. & Crawford, D. (2005). Australian Adult Consumers' Beliefs About Plant Foods: A Qualitative Study. *Health Education & Behavior*, **32**, 795–808.
- LeBlanc, J.G. & Sesma, F. (2007). Folate production by lactic acid bacteria and other food-grade microorganisms. *M*, **11**.
- LeClerc, S., Rampey, R.A. & Bartel, B. (2004). IAR4, a Gene Required for Auxin Conjugate Sensitivity in Arabidopsis, Encodes a Pyruvate Dehydrogenase E1 α Homolog. *Plant Physiology*, **135**, 989–999.
- Lee, R.D. & Nieman, D.C. (2013). *Nutritional assessment*.
- Lee, S. & Inglett, G.E. (2007). Effect of an Oat β -Glucan-Rich Hydrocolloid (C-trim30) on the Rheology and Oil Uptake of Frying Batters. *Journal of Food Science*, **72**, E222–E226.
- Leichter, J., Switzer, V.P. & Landymore, A.F. (1978). Effect of cooking on folate content of vegetables. *Nutrition Reports International (USA)*.
- Lestienne, I., Icard-Vernière, C., Mouquet, C., Picq, C. & Trèche, S. (2005). Effects of soaking whole cereal and legume seeds on iron, zinc and phytate contents. *Food Chemistry*, **89**, 421–425.
- Leterme, P. & Muñoz, L.C. (2002). Factors influencing pulse consumption in Latin America. *British Journal of Nutrition*, **88**, 251–254.
- Levie, R. de. (2012). Macro Bundle 12-Least Squares- Computing [Internet document] . ScribdURL <https://www.scribd.com/document/235810417/Macro-Bundle-12>. Accessed 18/05/2021.
- Loko, L.E.Y., Toffa, J., Adjatin, A., Akpo, A.J., Orobiyi, A. & Dansi, A. (2018). Folk taxonomy and traditional uses of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) landraces by the sociolinguistic groups in the central region of the Republic of Benin. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, **14**, 52.
- Lombard, M.J., Steyn, N.P., Charlton, K.E. & Senekal, M. (2015). Application and interpretation of multiple statistical tests to evaluate validity of dietary intake assessment methods. *Nutrition Journal*, **14**.
- Madode, Y.E., Nout, M.J.R., Bakker, E.-J., Linnemann, A.R., Hounhouigan, D.J. & Boekel, M.A.J.S. van. (2013). Enhancing the digestibility of cowpea (*Vigna unguiculata*) by traditional processing and fermentation. *LWT - Food Science and Technology*, **54**, 186–193.
- Madode, Y.E.E. (2012). *Keeping local foods on the menu: A study on the small-scale processing of cowpea*.
- Madode, Y.E.E., A Houssou, P., Linnemann, A., Hounhouigan, D., Nout, M.J. & Boekel, M. (2011). Preparation, Consumption, and Nutritional Composition of West African Cowpea Dishes. *Ecology of food and nutrition*, **50**, 115–36.
- Madode, Y.E.E., Linnemann, A.R., Nout, M.J.R., Vosman, B., Hounhouigan, D.J. & Boekel, M.A.J.S. van. (2012). Nutrients, technological properties and genetic relationships among twenty cowpea landraces cultivated in West Africa. *International Journal of Food Science & Technology*, **47**, 2636–2647.
- Magalhães, R.J.S. & Clements, A.C. (2011). Spatial heterogeneity of haemoglobin concentration in preschool-age children in sub-Saharan Africa. *Bull World Health Organ*, **10**.
- Manzetti, S., Zhang, J. & Spoel, D. van der. (2014). Thiamin Function, Metabolism, Uptake, and Transport. *Biochemistry*, **53**, 821–835.
- Maphosa, Y. & Jideani, V.A. (2016). Dietary fiber extraction for human nutrition—A review. *Food Reviews International*, **32**, 98–115.
- Maphosa, Y. & Jideani, V.A. (2017). The Role of Legumes in Human Nutrition. In: *Functional Food - Improve Health through Adequate Food* (edited by M.C. Hueda). InTech.
- Marcus, J.B. (2013). Chapter 7 - Vitamin and Mineral Basics: The ABCs of Healthy Foods and Beverages, Including Phytonutrients and Functional Foods: Healthy Vitamin and Mineral Choices, Roles and Applications in Nutrition, Food Science and the Culinary Arts. In: *Culinary Nutrition*. Pp. 279–331. San Diego: Academic Press.
- Martínez-Villaluenga, C., Frias, J. & Vidal-Valverde, C. (2008). Alpha-galactosides: antinutritional factors or functional ingredients? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **48**, 301–316.
- Mašková, E., Rysová, J., Fiedlerová, V., Holasová, M. & Vavreinová, S. (1996). Stability of selected vitamins and minerals during culinary treatment of legumes. *Potravinarske Vedy*, **14**, 321–328.

- Mchiza, Z., Steyn, N., Hill, J., Kruger, A., Schönfeldt, H., Nel, J. & Wentzel-Viljoen, E. (2015). A Review of Dietary Surveys in the Adult South African Population from 2000 to 2015. *Nutrients*, **7**, 8227–8250.
- McLean, E., Benoist, B. de & Allen, L.H. (2008). Review of the Magnitude of Folate and Vitamin B12 Deficiencies Worldwide. *Food and Nutrition Bulletin*, **29**, S38–S51.
- McWatters, K.H. (1983). Compositional, Physical, and Sensory Characteristics of Akara Processed from Cowpea Paste and Nigerian Cowpea Flour. *Cereal Chemistry*, **60**, 333–336.
- Mcwatters, K.H., Resurreccion, A.V.A. & Fletcher, S.M. (2007). Response of American consumers to akara, a traditional West African food made from cowpea paste. *International Journal of Food Science & Technology*, **25**, 551–557.
- Medic, J., Atkinson, C. & Hurlburgh, C.R. (2014). Current Knowledge in Soybean Composition. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, **91**, 363–384.
- Melendrez-Ruiz, J., Arvisenet, G., Laugel, V., Chambaron, S. & Monnery-Patris, S. (2020). Do French Consumers Have the Same Social Representations of Pulses as Food Industry Professionals? *Foods*, **9**, 147.
- Merchant, A.T., Dehghan, M., Chifamba, J., Terera, G. & Yusuf, S. (2005). Nutrient estimation from an FFQ developed for a black Zimbabwean population. *Nutrition Journal*, **4**, 37.
- Monge, A., Macias, L., Campos, H., Lajous, M. & Mattei, J. (2019). Perceptions and reasons for legume consumption in Mexico. *Nutrition & Food Science*, **49**, 1232–1242.
- Moreira, R.G., Sun, X. & Chen, Y. (1997). Factors affecting oil uptake in tortilla chips in deep-fat frying. *Journal of Food Engineering*, **31**, 485–498.
- Mouquet-Rivier, C. & Amiot, M.-J. (2019). Les légumineuses dans nos assiettes : que nous dit la science ? Nutriments et composés bioactifs. *Innovations Agronomiques* 74, 203–213.
- NCD-RisC. (2020). URL <https://ncdrisc.org/index.html>. Accessed 21/12/2020.
- Ndubuaku, V.O., Uwaegbute, A.C. & Nnanyelugo, D.O. (1989). Flatulence and other discomforts associated with consumption of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Appetite*, **13**, 171–181.
- Nelson, M., Atkinson, M. & Darbyshire, S. (1994). Food Photography I: the perception of food portion size from photographs. *British Journal of Nutrition*, **72**, 649–663.
- Nelson, M., Atkinson, M. & Darbyshire, S. (1996). Food photography II: use of food photographs for estimating portion size and the nutrient content of meals. *British Journal of Nutrition*, **76**, 31–49.
- Nelson, M. & Haraldsdóttir, J. (1998). Food photographs: practical guidelines II. Development and use of photographic atlases for assessing food portion size. *Public Health Nutrition*, **1**.
- Njoumi, S., Amiot, M.J., Rochette, I., Bellagha, S. & Mouquet-Rivier, C. (2019). Soaking and cooking modify the alpha-galacto-oligosaccharide and dietary fibre content in five Mediterranean legumes. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, **0**, 1–11.
- Njoumi, S., Bellagha, S., Icard-Vernière, C., Picq, C., Amiot, M.J. & Mouquet-Rivier, C. (2018). Effects of cooking and food matrix on estimated mineral bioavailability in Mloukhiya, a Mediterranean dish based on jute leaves and meat. *Food Research International*, **105**, 233–240.
- O'Briain, S. & Tucci, L.R. (2016). *Pulses: nutritious seeds for a sustainable future*.
- Odendo, M., Bationo, A. & Kimani, S. (2011). Socio-Economic Contribution of Legumes to Livelihoods in Sub-Saharan Africa. In: *Fighting Poverty in Sub-Saharan Africa: The Multiple Roles of Legumes in Integrated Soil Fertility Management* (edited by A. Bationo, B. Waswa, J.M. Okeyo, F. Maina, J. Kihara & U. Mokwunye). Pp. 27–46. Dordrecht: Springer Netherlands.
- OECD. (2019). *Safety Assessment of Foods and Feeds Derived from Transgenic Crops, Volume 3: Common bean, Rice, Cowpea and Apple Compositional Considerations*. Novel Food and Feed Safety. OECD.
- Ojwang, L.O., Yang, L., Dykes, L. & Awika, J. (2013). Proanthocyanidin profile of cowpea (*Vigna unguiculata*) reveals catechin-O-glucoside as the dominant compound. *Food Chemistry*, **139**, 35–43.
- Oke, E.K., Idowu, M.A., Sobukola, O.P., Adeyeye, S.A.O. & Akinsola, A.O. (2018). Frying of Food: A Critical Review. *Journal of Culinary Science & Technology*, **16**, 107–127.
- Ologhobo, A.D. & Fetuga, B.L. (1984). Distribution of Phosphorus and Phytate in Some Nigerian Varieties of Legumes and Some Effects of Processing. *Journal of Food Science*, **49**, 199–201.
- Olujobi, O.J. (2012). Comparative Evaluation of Nutritional Composition of African Locust Bean (*Parkia biglobosa*) Fruits from Two Locations. *Nigerian Journal of Basic and Applied Sciences*, **20**, 195–198.
- Osseyi, E.S., Wehling, R.L. & Albrecht, J.A. (2001). HPLC Determination of Stability and Distribution of Added Folic Acid and Some Endogenous Folates During Breadmaking. *Cereal Chemistry*, **78**, 375–378.
- Oyewale, R.O., Bello, L.Y., Idowu, G.A., Ibrahim, H.M. & Isah, A.S. (2014). Rate of insecticide formulations on the damage assessment, yield and yield components of cowpea, 10.

- Padhi, E.M.T. & Ramdath, D.D. (2017). A review of the relationship between pulse consumption and reduction of cardiovascular disease risk factors. *Journal of Functional Foods*, **38**, 635–643.
- Papanikolaou, Y. & Fulgoni, V.L. (2008). Bean Consumption Is Associated with Greater Nutrient Intake, Reduced Systolic Blood Pressure, Lower Body Weight, and a Smaller Waist Circumference in Adults: Results from the National Health and Nutrition Examination Survey 1999–2002. *Journal of the American College of Nutrition*, **27**, 569–576.
- Peleg, M. (2019). Modeling Degradation Kinetics in Dry Foods Storage under Varying Temperature and Moisture Content—Theoretical Evaluation. *Food Engineering Reviews*, **11**, 1–13.
- Perez, E.E., Carelli, A.A. & Crapiste, G.H. (2011a). Temperature-dependent diffusion coefficient of oil from different sunflower seeds during extraction with hexane. *Journal of Food Engineering*, **105**, 180–185.
- Perez, E.E., Carelli, A.A. & Crapiste, G.H. (2011b). Temperature-dependent diffusion coefficient of oil from different sunflower seeds during extraction with hexane. *Journal of Food Engineering*, **105**, 180–185.
- Petry, N., Olofin, I., Hurrell, R.F., Boy, E., Wirth, J.P., Moursi, M., Donahue Angel, M. & Rohner, F. (2016). The Proportion of Anemia Associated with Iron Deficiency in Low, Medium, and High Human Development Index Countries: A Systematic Analysis of National Surveys. *Nutrients*, **8**.
- Phillips, R.D. (2012). Cowpea Processing and Products. In: *Dry Beans and Pulses Production, Processing and Nutrition* (edited by M. Siddiq & M.A. Uebersax). Pp. 235–259. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
- Phillips, R.D., McWatters, K.H., Chinnan, M.S., Hung, Y.-C., Beuchat, L.R., Sefa-Dedeh, S., Sakyi-Dawson, E., Ngoddy, P., Nnanyelugo, D., Enwere, J., Komey, N.S., Liu, K., Mensa-Wilmot, Y., Nnanna, I.A., Okeke, C., Prinyawiwatkul, W. & Saalia, F.K. (2003). Utilization of cowpeas for human food. *Field Crops Research*, **82**, 193–213.
- Prodanov, M., Sierra, I. & Vidal-Valverde, C. (1997). Effect of germination on the thiamine, riboflavin and niacin contents in legumes. *Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und -Forschung A*, **205**, 48–52.
- Prodanov, M., Sierra, I. & Vidal-Valverde, C. (2004). Influence of soaking and cooking on the thiamin, riboflavin and niacin contents of legumes. *Food Chemistry*, **84**, 271–277.
- Pushpamma, P. (1975). Evaluation of nutritional value, cooking quality and consumer preferences of grain legumes. In: *ICRISAT. Proceedings of the International workshop on grain legumes*.
- Quilliot, D., Michot, N., Brunaud, L. & Malgras, A. (2017). Déficit en vitamine B1 : comment prévenir et traiter. *Nutrition Clinique et Métabolisme*, **31**, 176–180.
- Ramaswamy, H., Ghazala, S. & Voort, F. van de. (1990). Degradation Kinetics of Thiamine in Aqueous Systems at High Temperatures. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, **23**, 125–130.
- Rawal, V. & Navarro, D.K. (2019). *The Global of Economy Pulses*. Rome, FAO.
- Reddy, N.R. (2002). Occurrence, distribution, content, and dietary intake of phytate. In: *Food Phytates* (edited by N.R. Reddy & S.K. Sathe). Boca Raton, FL: CRC Press. Pp 25–52.
- Reddy, N.R., Salunkhe, D.K. & Sharma, R.P. (1980a). FLATULENCE IN RATS FOLLOWING INGESTION OF COOKED AND GERMINATED BLACK GRAM AND A FERMENTED PRODUCT OF BLACK GRAM AND RICE BLEND. *Journal of Food Science*, **45**, 1161–1164.
- Reddy, N.R., Salunkhe, D.K. & Sharma, R.P. (1980b). Flatulence in Rats Following Ingestion of Cooked and Germinated Black Gram and a Fermented Product of Black Gram and Rice Blend. *Journal of Food Science*, **45**, 1161–1164.
- Reddy, N.R., Sathe, S.K. & Salunkhe, D.K. (1982). Phytates in Legumes and Cereals. In: *Advances in Food Research*. Pp. 1–92. Elsevier.
- Rizkalla, S.W., Bellisle, F. & Slama, G. (2002). Health benefits of low glycaemic index foods, such as pulses, in diabetic patients and healthy individuals. *British Journal of Nutrition*, **88**, 255–262.
- Rogério, W.F., Greiner, R., Nunes, I.L., Feitosa, S., Furtunato, D.M. da N. & Almeida, D.T. de. (2014). Effect of preparation practices and the cowpea cultivar *Vigna unguiculata* L.Walp on the quality and content of myo-inositol phosphate in akara (fried bean paste). *Food Science and Technology (Campinas)*, **34**, 243–248.
- Rossell, J.B. (2001). *Frying: Improving Quality*. Woodhead Publishing.
- Rychlik, M., Englert, K., Kapfer, S. & Kirchhoff, E. (2007). Folate contents of legumes determined by optimized enzyme treatment and stable isotope dilution assays. *Journal of Food Composition and Analysis*, **20**, 411–419.
- Saguy, I.S. (Hebrew U. of J. (Israel) F. of A.F. and E.Q.S., Ufheil, G. & Livings, S. (1998). Oil uptake in deep-fat frying: review. *Oleagineux Corps Gras Lipides (France)*.
- Saini, R.K., Nile, S.H. & Keum, Y.-S. (2016). Folates: Chemistry, analysis, occurrence, biofortification and bioavailability. *Food Research International*, **89**, 1–13.

- Sandberg, A.-S. (2002). Bioavailability of minerals in legumes. *British Journal of Nutrition*, **88**, 281–285.
- Saubade, F., Hemery, Y.M., Guyot, J.-P. & Humblot, C. (2017). Lactic acid fermentation as a tool for increasing the folate content of foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **57**, 3894–3910.
- Schakel, S.F., Buzzard, I.M. & Gebhardt, S.E. (1997). Procedures for Estimating Nutrient Values for Food Composition Databases. *Journal of Food Composition and Analysis*, **10**, 102–114.
- Schmidt, A., Pratsch, H., Schreiner, M.G. & Mayer, H.K. (2017). Determination of the native forms of vitamin B1 in bovine milk using a fast and simplified UHPLC method. *Food Chemistry*, **229**, 452–457.
- Schneider, A. & Huyghe, C. (2015). *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*. Éditions Quae.
- Sebetha, E.T., Modi, A.T. & Owoeye, L.G. (2014). Cowpea Crude Protein as Affected by Cropping System, Site and Nitrogen Fertilization. *Journal of Agricultural Science*, **7**.
- Sefa-Dedeh, S., Stanley, D.W. & Voisey, P.W. (1979). EFFECT OF STORAGE TIME AND CONDITIONS ON THE HARD-TO-COOK DEFECT IN COWPEAS (*Vigna unguiculata*). *Journal of Food Science*, **44**, 790–795.
- Sekhon, J., Grewal, S.K., Singh, I. & Kaur, J. (2017). Evaluation of nutritional quality and antioxidant potential of pigeonpea genotypes. *Journal of Food Science and Technology*, **54**, 3598–3611.
- Shamsuddin, A.M. (1995). Inositol Phosphates Have Novel Anticancer Function. *The Journal of Nutrition*, **125**, 725S–732S.
- Sievenpiper, J.L., Kendall, C.W.C., Esfahani, A., Wong, J.M.W., Carleton, A.J., Jiang, H.Y., Bazinet, R.P., Vidgen, E. & Jenkins, D.J.A. (2009). Effect of non-oil-seed pulses on glycaemic control: a systematic review and meta-analysis of randomised controlled experimental trials in people with and without diabetes. *Diabetologia*, **52**, 1479.
- Singh, A., Hung, Y.-C., Phillips, R.D., Chinnan, M.S. & McWatters, K.H. (2004). Particle-size Distribution of Cowpea Flours Affects Quality of Akara (Fried Cowpea Paste). *Journal of Food Science*, **69**, 243–249.
- Singh, S., Shankar, R. & Singh, G.P. (2017). Prevalence and Associated Risk Factors of Hypertension: A Cross-Sectional Study in Urban Varanasi. *International Journal of Hypertension*, **2017**.
- Singh, U. (1988). Antinutritional factors of chickpea and pigeonpea and their removal by processing. *Plant Foods for Human Nutrition*, **38**, 251–261.
- Singh, U., Jain, K.C., Jambunathan, R. & Faris, D.G. (1984). Nutritional Quality of Vegetable Pigeonpeas [Cajanus cajan (L.) Mill sp.]: Mineral and Trace Elements. *Journal of Food Science*, **49**, 645–646.
- Singh, U. & Seetha, R. (1993). Oil Absorption and Sensory Properties of a Snack Food from Chickpea Genotypes. *Journal of Food Science*, **58**, 853–855.
- Sodjinou, R., Agueh, V., Fayomi, B. & Delisle, H. (2009). Dietary patterns of urban adults in Benin: relationship with overall diet quality and socio-demographic characteristics. *European Journal of Clinical Nutrition*, **63**, 222–228.
- Sombié, P., Compaoré, M., Coulibaly, A., Ouédraogo, J., Tignégré, J.-B. & Kiendrébéogo, M. (2018). Antioxidant and Phytochemical Studies of 31 Cowpeas (*Vigna unguiculata* (L. Walp.)) Genotypes from Burkina Faso. *Foods*, **7**, 143.
- Somiari, R.I. & Balogh, E. (1992). Hydrolysis of raffinose and stachyose in cowpea (*Vigna unguiculata*) flour, using α -galactosidase from *Aspergillus niger*. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, **8**, 564–566.
- Somiari, R.I. & Balogh, E. (1993). Effect of soaking, cooking and crude α -galactosidase treatment on the oligosaccharide content of cowpea flours. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **61**, 339–343.
- Sossa, C., Delisle, H., Agueh, V., Sodjinou, R., Ntandou, G. & Makoutodé, M. (2013). Lifestyle and Dietary Factors Associated with the Evolution of Cardiometabolic Risk over Four Years in West-African Adults: The Benin Study. *Journal of Obesity*, **2013**, 1–9.
- Sreerama, Y.N., Neelam, D.A., Sashikala, V.B. & Pratape, V.M. (2010). Distribution of Nutrients and Antinutrients in Milled Fractions of Chickpea and Horse Gram: Seed Coat Phenolics and Their Distinct Modes of Enzyme Inhibition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **58**, 4322–4330.
- Sreerama, Y.N., Sashikala, V.B., Pratape, V.M. & Singh, V. (2012). Nutrients and antinutrients in cowpea and horse gram flours in comparison to chickpea flour: Evaluation of their flour functionality. *Food Chemistry*, **131**, 462–468.
- Srikiatden, J. & Roberts, J.S. (2007). Moisture Transfer in Solid Food Materials: A Review of Mechanisms, Models, and Measurements. *International Journal of Food Properties*, **10**, 739–777.
- Stadlmayr, B., Addy, P., Samb, B., Enujiugha, N.V., G Bayili, R., Fagbohoun, G.E., Smith, I.F., Thiam, I. & Burlingame, B. (2010). *Composition of selected foods from West Africa*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- Stagnari, F., Maggio, A., Galieni, A. & Pisante, M. (2017). Multiple benefits of legumes for agriculture sustainability: an overview. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, **4**, 2.
- Staveren, W.A. van, Ocké, M.C. & vries, J.H.M. de. (2012). Estimation of Dietary Intake. In: *Present Knowledge in Nutrition* (edited by J.W. Erdman, I.A. Macdonald & S.H. Zeisel). Pp. 1012–1026. Oxford, UK: Wiley-Blackwell.
- Steinemann, N., Grize, L., Ziesemer, K., Kauf, P., Probst-Hensch, N. & Brombach, C. (2017). Relative validation of a food frequency questionnaire to estimate food intake in an adult population. *Food & Nutrition Research*, **61**, 1305193.
- Steiner, T., Mosenthin, R., Zimmermann, B., Greiner, R. & Roth, S. (2007). Distribution of phytase activity, total phosphorus and phytate phosphorus in legume seeds, cereals and cereal by-products as influenced by harvest year and cultivar. *Animal Feed Science and Technology*, **133**, 320–334.
- Strandler, H.S., Patring, J., Jägerstad, M. & Jastrebova, J. (2015). Challenges in the Determination of Unsubstituted Food Folates: Impact of Stabilities and Conversions on Analytical Results. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **63**, 2367–2377.
- Suitor, C.W. & Bailey, L.B. (2000). Dietary Folate Equivalents: Interpretation and Application. *Journal of the American Dietetic Association*, **100**, 88–94.
- Syamsiah, S. & Marseno, D.W. (2016). APPLICATION OF SECOND ORDER KINETIC MODEL ON THE EXTRACTION OF GLUCOMANNAN FROM PORANG (Amorphophallus), **11**, 4.
- Tai, C.-Y., Yang, J. & Ho, C.-T. (1999). Effect of Thiamin Oxidation on Thermal Formation of Meaty Aroma Compounds. In: *Quality Attributes of Muscle Foods* (edited by Y.L. Xiong, H. Chi-Tang & F. Shahidi). Pp. 173–190. Boston, MA: Springer US.
- Taiwo, K.A. (1998). The potential of cowpea as human food in Nigeria, **18**, 469–481.
- Taiwo, K.A. & Akanbi, O.C. (1997). The Effects of Soaking and Cooking Time on the Cooking Properties of Two Cowpea Varieties, **33**, 337–346.
- Tallaksen, C.M.E., Sande, A., Bøhmer, T., Bell, H. & Karlsen, J. (1993). Kinetics of thiamin and thiamin phosphate esters in human blood, plasma and urine after 50 mg intravenously or orally. *European Journal of Clinical Pharmacology*, **44**, 73–78.
- Tharanathan, R.N. & Mahadevamma, S. (2003). Grain legumes—a boon to human nutrition. *Trends in Food Science & Technology*, **14**, 507–518.
- Thirunathan, P. & Manickavasagan, A. (2018). Processing methods for reducing alpha-galactosides in pulses. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **0**, 1–12.
- Thompson, L.U. (1993). Potential health benefits and problems associated with antinutrients in foods. *Food Research International*, **26**, 131–149.
- Thomson, A.D., Cook, C.C.H., Touquet, R., Henry, J.A. & Royal College of Physicians, London. (2002). The Royal College of Physicians report on alcohol: guidelines for managing Wernicke's encephalopathy in the accident and Emergency Department. *Alcohol and Alcoholism (Oxford, Oxfordshire)*, **37**, 513–521.
- Timko, M.P., Ehlers, J.D. & Roberts, P.A. (2007). Cowpea. In: *Pulses, Sugar and Tuber Crops*, Genome Mapping and Molecular Breeding in Plants (edited by C. Kole). Pp. 49–67. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Timko, M.P. & Singh, B.B. (2008). Cowpea, a Multifunctional Legume. In: *Genomics of Tropical Crop Plants* (edited by P.H. Moore & R. Ming). Pp. 227–258. New York, NY: Springer New York.
- Trystram, G. (2012). Modelling of food and food processes. *Journal of Food Engineering*, International Conference on Food Innovation - foodInnova 2010, **110**, 269–277.
- Unal, H., Isik, E. & Can Alpsoy, H. (2006). Some Physical and Mechanical Properties of Black-eyed Pea (*Vigna unguiculata* L.) Grains. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, **9**, 1799–1806.
- Uzogara, S.G., Morton, I.D. & Daniel, J.W. (1988). Quality changes and mineral content of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) seeds processed with 'Kanwa' alkaline salt. *Food Chemistry*, **30**, 1–18.
- Uzogara, S.G., Morton, I.D. & Daniel, J.W. (1991). Thiamin, Riboflavin and Niacin Retention in Cooked Cowpeas as Affected by Kanwa Treatment. *Journal of Food Science*, **56**, 592–593.
- Uzogara, S.G. & Ofuya, Z.M. (1992). Processing and utilization of cowpeas in developing countries: a review. *Journal of Food Processing and Preservation*, **16**, 105–147.
- Vanchina, M.A., Chinnan, M.S. & Mcwatters, K.H. (2006). Effect of processing variables of cowpea (*vigna unguiculata*) meal on the functional properties of cowpea paste and quality of akara (fried cowpea paste). *Journal of Food Quality*, **29**, 552–566.
- Venn, B.J., Perry, T., Green, T.J., Skeaff, C.M., Aitken, W., Moore, N.J., Mann, J.I., Wallace, A.J., Monro, J., Bradshaw, A., Brown, R.C., Skidmore, P.M.L., Doel, K., O'Brien, K., Frampton, C. & Williams, S. (2010).

- The Effect of Increasing Consumption of Pulses and Wholegrains in Obese People: A Randomized Controlled Trial. *Journal of the American College of Nutrition*, **29**, 365–372.
- Villegas, R., Yang, G., Liu, D., Xiang, Y.-B., Cai, H., Zheng, W. & Ou Shu, X. (2007). Validity and reproducibility of the food-frequency questionnaire used in the Shanghai Men's Health Study. *British Journal of Nutrition*, **97**, 993–1000.
- Vitrac, O. & Touffet, M. (2019). Réduire les matières grasses dans les produits frits. *Innovations Agronomiques*, **78**, 81–94.
- Whitfield, K.C., Bourassa, M.W., Adamolekun, B., Bergeron, G., Bettendorff, L., Brown, K.H., Cox, L., Fattal-Valevski, A., Fischer, P.R., Frank, E.L., Hiffler, L., Hlaing, L.M., Jefferds, M.E., Kapner, H., Kounnavong, S., Mousavi, M.P.S., Roth, D.E., Tsaloglou, M., Wieringa, F. & Combs, G.F. (2018). Thiamine deficiency disorders: diagnosis, prevalence, and a roadmap for global control programs. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **1430**, 3–43.
- WHO (Ed.). (2004). *Vitamin and mineral requirements in human nutrition*. second edition. Geneva.
- WHO. (2017). Prevalence of anaemia in women - Estimates by country [Internet document] . WHOURL <https://apps.who.int/gho/data/view.main.GSWCAH28v>. Accessed 22/02/2021.
- WHO-FAO (Ed.). (2003). *Diet, nutrition, and the prevention of chronic diseases*. WHO technical report series. Geneva: World Health Organization.
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L.J., Fanzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J.A., De Vries, W., Majele Sibanda, L., Afshin, A., Chaudhary, A., Herrero, M., Agustina, R., Branca, F., Lartey, A., Fan, S., Crona, B., Fox, E., Bignet, V., Troell, M., Lindahl, T., Singh, S., Cornell, S.E., Srinath Reddy, K., Narain, S., Nishtar, S. & Murray, C.J.L. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, **393**, 447–492.
- Wilson, C. (2013). Consumption of legumes might be beneficial in type 2 diabetes mellitus. *Nature Reviews Endocrinology*, **9**, 3–3.
- Winham, D.M. & Hutchins, A.M. (2011). Perceptions of flatulence from bean consumption among adults in 3 feeding studies. *Nutrition Journal*, **10**, 128.
- Xue, S., Ye, X., Shi, J., Jiang, Y., Liu, D., Chen, J., Shi, A. & Kakuda, Y. (2011). Degradation kinetics of folate (5-methyltetrahydrofolate) in navy beans under various processing conditions. *LWT - Food Science and Technology*, **44**, 231–238.
- Yadav, D.N. & Rajan, A. (2012). Fibres as an additive for oil reduction in deep fat fried poori. *Journal of Food Science and Technology*, **49**, 767–773.
- Yadav, N., Kaur, D., Malaviya, R., Singh, M., Fatima, M. & Singh, L. (2018). Effect of thermal and non-thermal processing on antioxidant potential of cowpea seeds. *International Journal of Food Properties*, **21**, 437–451.

Annexes

Annexe 1 : Questionnaire de l'enquête de fréquence de consommation alimentaire



Enquête sur la consommation du niébé par les adultes des communes d'Adjohoun et Allada, Bénin (Projet Transnut-Niébé)

Identification

Numéro du ménage /_/_/_/_/_

Critères d'inclusion :

- Adultes (femmes et hommes) âgés de 19-65 ans
- Habitent la commune depuis plus de 1 an
- Ayant donné leur consentement pour participer à l'enquête.

A1	Commune :	1. Adjohoun 2. Allada	/_/_
A2	Arrondissement :	(1 à 8) pour Adjohoun et (1-13) pour Allada	/_/_
A3	Village :	(1 à 24) pour Adjohoun et (25-63) pour Allada	/_/_
	Date de l'enquête:	/_/_/_/_/2019	/_/_/_/_/_
A4	Enquêteur :	1, 2, 3, 4, 5 ou 6	/_/_

I- Composition du ménage

B1	Nombre de personne dans le ménage			/_/_/_
B2	N°	Identification de chaque personne du ménage.		
		Place dans le ménage. 1-Mari 2-Maitresse de maison 3-Enfant 4-Grand-parent 5-autre, préciser		
			/_/_/_	/_/_
			/_/_/_	/_/_
			/_/_/_	/_/_
			/_/_/_	/_/_
			/_/_/_	/_/_
			/_/_/_	/_/_
			/_/_/_	/_/_
			/_/_/_	/_/_
			/_/_/_	/_/_
			/_/_/_	/_/_
			/_/_/_	/_/_
			/_/_/_	/_/_

Annexe 1 : Questionnaire de l'enquête FFQ

*Enquête de consommation du niébé dans les communes d'Adjohoun et Allada
Université d'Abomey –Calavi et IRD – 2019*

		/_/_/_	/_/_/_
		/_/_/_	/_/_/_
		/_/_/_	/_/_/_
		/_/_/_	/_/_/_

II- Caractéristiques socio-économiques du ménage.

Dans cette partie, la « méthode des 10 cailloux » peut être utilisée pour permettre aux enquêtés de représenter visuellement la proportion de leur budget mensuel utilisée pour les dépenses d'alimentation ou d'habillement

B3	Quel est le revenu mensuel du ménage ? 1=Moins de 20.000 Fcfa, 2=Entre 20.000 et 50.000 Fcfa, 3=Entre 50.000 et 100.000 Fcfa, 4=Plus de 100.000 Fcfa, 5=Ne sait pas, 6=Ne souhaite pas répondre	/_/_
B4	Combien de personnes contribuent au revenu du ménage ?	/_/_
B5	Quelle somme est dépensée par le ménage en moyenne par mois pour l'alimentation ? 1 - Moins de 10 000 Fcfa 2- Entre 10 000 et 40 000 Fcfa 3-Plus de 40 000 Fcfa 4- Ne sait pas 5 - Ne souhaite pas répondre Si « Ne sait pas », Référez-vous à B6	/_/_
B6	Nombre de Cailloux 1=C1 2=C2 3=C3 4=C4 5=C5 6=C6 7=C7 8=C8 9=C9 10=C10	/_/_
B7	Possédez-vous un ou plusieurs moyens de transports ? 1- Oui 0-Non	/_/_
B8	Combien des véhicules suivants possédez-vous dans votre ménage ? Le nombre de moyens de transports cités doit correspondre au nombre inscrit à la question B7 1-Vélo 2-Moto 3-Voiture 4 – Charrrette 5-Pirogue 6-camion 7 autre (préciser)	/_/_ /_/_ /_/_ /_/_ /_/_ /_/_ /_/_
B9	Quelle somme est dépensée par le ménage en moyenne par mois pour l'habillement (pagnes, tissus ...) ? 1 - Moins de 10 000 Fcfa 2- Entre 10 000 et 40 000 Fcfa 3-Plus de 40 000 Fcfa 4- Ne sait pas 5 - Ne souhaite pas répondre Si « Ne sait pas », Référez-vous à la question B10	/_/_
B10	Nombre de Cailloux 1=C1 2=C2 3=C3 4=C4 5=C5 6=C6 7=C7 8=C8 9=C9 10=C10	/_/_/_

III- Caractéristiques socio-professionnelles du chef de ménage.

C1	Quel âge a le chef de ménage ? (années)	/_/_/_
C2	Sexe du chef de ménage : 1- féminin , 2- masculin	/_/_

*Enquête de consommation du niébé dans les communes d'Adjohoun et Allada
Université d'Abomey –Calavi et IRD – 2019*

C3	Quelle est la dernière classe que le chef de ménage a fréquentée?	Dernière classe fréquentée /_/_	/_/_		
	1-Aucun 2-Niveau primaire 3-Niveau secondaire 1 4-Niveau secondaire 2 5-Supérieur				
C4	Quel est le métier du chef de ménage ? 1-Administration 2-Artisanat 3-Agriculture, élevage 4-Commerce et restauration 5-Industrie 6-Transport et communication 7-Service (ménages ...) 8-BTP 9-Eau, électricité, gaz 10-Enseignement 11-Santé 12-Non actif 13-Autre, préciser : <i>Si le chef de ménage est un agriculteur, continuez avec la question C5 à C8 Si non, continuez avec C9</i>		/_/_/_		
C5	Quelles sont les cultures que vous produisez? <i>(Plusieurs réponses possibles, possibles, cocher 1 dans les cases si oui, 0, si non)</i> 1-Mais 2-Manioc 3-Niébé 4-Tomates 5-Patate douce 6- Riz 7- Canne à sucre 8-Ananas 9-Palmier à huile 10-Légumes frais 11-Autres, précisez :		/_/_ /_/_ /_/_ /_/_ /_/_ /_/_ /_/_ /_/_ /_/_ /_/_ /_/_		
C6	<i>Pourquoi cultivez-vous du niébé (plusieurs réponses possibles, cocher 1 dans les cases si oui, 0, si non)?</i> 1-parce que mon père en cultivait 2-Culture liée à la région 3-Culture donnant un meilleur profit financier 4-Culture très demandée sur le marché 5-Culture pour la consommation uniquement dans le ménage 6- autre raison, précisez		/_/_ /_/_ /_/_ /_/_ /_/_ /_/_		
C7	Quelles sont les variétés de niébé que vous cultivez et pour quelles utilisations? Citez les variétés produites par ordre d'importance (plusieurs réponses possibles)	N°	C7.1 Nom de la variété	C7.2 Couleur de la variété	C7.3 Utilisations variété
			1. Blanche	2. Rouge	3. Vente
			3. Noire	4.autre	2-Alimentation du ménage
					3-Nourriture pour bétail (élevage) <i>(Plusieurs réponses possibles)</i>

Annexe 1 : Questionnaire de l'enquête FFQ

*Enquête de consommation du niébé dans les communes d'Adjohoun et Allada
Université d'Abomey –Calavi et IRD – 2019*

C8	Situation matrimoniale actuelle : 1-célibataire 2-marié, monogame 3-marié, polygame 4-divorcé 5-union libre 6-veuf	/_/_
-----------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------

IV- Qualité de l'habitat et niveau socio-économique du ménage.

D1	Le type de logement : 1- Villa 2 - Maison isolée 3 - Appartement 4 - Case isolée 5 - Maison en bandes	/_/_
D2	Occupez-vous la maison en tant que : 1=propriétaire, 2= locataire, 3= titre gratuit	/_/_
D3	Combien de pièces habitables (<i>sans compter cuisine, WC, douche</i>) y a-t-il dans la maison ? _____	/_/_
D4	De quel matériau est composé le sol ? 1- Terre, sable 2-Carrelage 3- Ciment 4 -Bois/planche ou bambou 5- Autre (préciser) : _____	/_/_
D5	De quel matériau sont composés les murs extérieurs ? : 1-Bois/Planche ou bambou 2-Pailles ou branches de palmier 3-Terre 4-Pierre 5 – Ciment/Briques 6 - Autre (préciser) : _____	/_/_
D6	De quel matériau est composé le toit ? 1- Dalle en ciment 2 - Planches bois ou bambou 3-Tôle 4-Tuiles 5 - Autre (préciser) : _____	/_/_
D7	Avez-vous l'électricité dans la maison ? 1= Oui, 0= Non	/_/_
D8	Possédez-vous un groupe électrogène ? 1- Oui 0-Non	/_/_
D9	Quelle est votre principale source d'approvisionnement en eau ? 1 - Robinet dans la maison 2 - Robinet dans la cour/jardin 3 - Borne fontaine publique 4 - Puits/Forage privé 5 -Puits/Forage collectif 6 - Source 7 - Autre (préciser) : _____	/_/_
D10	Quel type de toilettes utilisez-vous ? 1-Toilettes améliorées non partagées 2 - Toilettes partagées par 2 ménages ou plus 3 - Toilettes non améliorées	/_/_
D11	Où cuisinez-vous ? 1= à l'intérieur de la maison (cuisine séparée), 2= à l'intérieur (pièce non séparée), 3= à l'extérieur de la maison dans une pièce, 4= en plein air sous abri, 5= en plein air sans abri	/_/_
D12	Possédez-vous un ou plusieurs champs pour l'agriculture? 1-Oui 0-Non Si oui, passez à la question D13 Si non, Continuez avec D15	/_/_

*Enquête de consommation du niébé dans les communes d'Adjohoun et Allada
Université d'Abomey –Calavi et IRD – 2019*

D13	Combien de champ(s) possède le ménage ?	/_/_/_
D14	Quelle est la surface que vous cultivez ? 1. Moins de 10 Kanti 2. Entre 10 et 50 Kanti 3- Entre 50 et 100 Kanti 4- Plus de 100 Kanti 5. Ne sait pas	/_/_
D15	Quel est le type de main-d'œuvre que vous utilisez pour les travaux au champ ? 1-Main d'œuvre familiale 2-Recrutement d'ouvriers 3- vous seulement	/_/_

V- Repas du ménage

D16	Habituellement, combien de personnes partagent le repas du soir ?	/_/_
D17	Qui est la personne qui décide des achats alimentaires dans le ménage ? 1 - Mère 2 - Chef de ménage 3 - Autres personnes du ménage 4 – Bonne / employée	/_/_
D18	Est-ce que la maîtresse de maison (mère) est différente du chef de ménage ? 1- Oui 0-Non	/_/_
D19	Qui est la personne cuisinant les repas dans le ménage ? 1 - Mère 2 - Chef de ménage 3 - Autres personnes du ménage 4 – Bonne / employée	/_/_

VI- Identification de la personne enquêtée

E1	Quel est votre âge? L'âge doit être compris entre 19 et 65 ans (inclus).	/_/_/_
E2	Sexe de la personne enquêtée : 1- féminin 2- masculin	/_/_
E4	Quel est votre département d'origine ? 1-Atacora 2-Alibori 3-Atlantique 4-Borgou 5-Collines 6-Couffo 7-Donga 8-Mono 9-Littoral 10-Ouémé 11-Plateau 12-Zou 13 – Autre (préciser) _____ <i>Posez la question E5 si l'enquêté n'est pas originaire de la commune où se déroule l'étude.</i>	/_/_/_
E5	Depuis combien d'années êtes-vous installé ici ?	/_/_/_/_
E6	De quelle ethnie êtes-vous ? 1 - Adja 2 – Fon 3 – Bariba 4 - Dandi 5 - Yoa et Lokpa 6 – Peulh 7 - Gua ou Otamari 8 – Yoruba 9 - Autre ethnie du Bénin 10 - Ethnie étrangère <i>Si l'enquêté n'est pas le chef de ménage, lui poser les questions E7 à E10</i>	/_/_/_

*Enquête de consommation du niébé dans les communes d'Adjohoun et Allada
Université d'Abomey –Calavi et IRD – 2019*

E7	Quelle est la dernière classe que vous avez fréquentée? Dernière classe fréquentée 1-Aucun 2-Niveau primaire 3-Niveau secondaire 1 4-Niveau secondaire 2 5-Supérieur	/_/_	/_/_
E8	Quelle est votre catégorie socio-professionnelle ? 1 – Cadre 2 - Employé qualifié 3 – Manœuvre 4 – Patron 5 - Propre compte 6 - Aide familial/Apprenti 7 - Sans emploi	/_/_	
E9	Dans quel secteur ?1 - Secteur public 2 - Secteur privé 3 - Secteur informel	/_/_	
E10	Quel est votre secteur professionnel ? 1-Administration 2-Artisanat 3-Agriculture 4-Commerce et restauration 5-Industrie 6-Transport et communication 7-Service (ménages ...) 8-BTP 9-Eau, électricité, gaz 10-Enseignement 11-Santé 12-Non actif	/_/_/_	

VII- Consommation de légumineuses au cours de la semaine précédente

F1	Avez-vous consommé de l'afitin (néré) au cours de cette dernière semaine ? 1-Oui 2-Non	/_/_	
F2	Si oui, combien de fois avez-vous consommé de l'afitin cette dernière semaine ? 1 – 1 fois 2 - 2 fois 3- 3 fois 4- 4 fois 5 – 5 fois 6 -6 fois 7- Tous les jours 8- Plusieurs fois par jour	/_/_	
F3	Avez-vous consommé du voandzou au cours de cette dernière semaine ? 1-Oui 2-Non	/_/_	
F4	Si oui, sous quelle forme ? (Plusieurs réponses possibles) 1 - Voandzou + riz 1- oui 0- non 2 - Voandzou + gari 1- oui 0- non 3 - Voandzou + pain de blé 1- oui 0- non 4 - Autre (préciser)..... 1- oui 0- non	/_/_	/_/_
F5	Combien de fois avez-vous consommé du voandzou cette dernière semaine ? 1 – 1 fois 2 - 2 fois 3- 3 fois 4- 4 fois 5 – 5 fois 6 -6 fois 7- Tous les jours 8- Plusieurs fois par jour	/_/_	
F6	Avez-vous consommé de l'arachide au cours de cette dernière semaine ? 1-Oui 2-Non	/_/_	
F7	Si oui, sous quelle forme ? 1 - Sauce 1- oui 0- non 2 - Concada 1- oui 0- non 3 - Nougat 1- oui 0- non 4 - Arachide bouillie 1- oui 0- non 5 - Arachide torréfiée 1- oui 0- non 6- Autre (préciser)..... 1- oui 0- non	/_/_	/_/_

*Enquête de consommation du niébé dans les communes d'Adjohoun et Allada
Université d'Abomey –Calavi et IRD – 2019*

F8	Combien de fois avez-vous consommé des arachides cette dernière semaine ? 1 – 1 fois 2 - 2 fois 3- 3 fois 4- 4 fois 5 – 5 fois 6 -6 fois 7-Tous les jours 8-Plusieurs fois par jour	/_/_
F9	Avez-vous consommé du soja au cours de cette dernière semaine ? 1-Oui 2-Non	/_/_
F10	Si oui, sous quelle forme ? 1 – Bouillie 1- oui 0- non 2 – Fromage 1- oui 0- non 3 – Lait 1- oui 0- non 4 – Beignet 1- oui 0- non 5- Autre (préciser) 1- oui 0- non	/_/_
F11	Combien de fois avez-vous consommé du soja cette dernière semaine ? 1 – 1 fois 2 - 2 fois 3- 3 fois 4- 4 fois 5 – 5 fois 6 -6 fois 7-Tous les jours 8-Plusieurs fois par jour	/_/_
F12	Avez-vous consommé du Doyiwé au cours de cette dernière semaine ? 1-Oui 0-Non	/_/_
F13	Si oui, sous quelle forme ? 1-Cassoulet (Doyiwé) 2-Autre (préciser)	/_/_
F14	Combien de fois avez-vous consommé le Doyiwé cette dernière semaine ? 1 – 1 fois 2 - 2 fois 3- 3 fois 4- 4 fois 5 – 5 fois 6 -6 fois 7-Tous les jours 8-Plusieurs fois par jour	/_/_
F15	Avez-vous consommé d'autres légumineuses ? 1=Oui 2=Non Si Oui lesquels et précisez la forme de consommation.	/_/_
F16	F16. 1. Autre légumineuse 1 _____ Forme de transformation consommée : _____	
	F16. 2. Autre légumineuse 2 _____ Forme de transformation consommée : _____	
	F16. 3. Autre légumineuse 3 _____ Forme de transformation consommée : _____	

VIII- Consommation générale de niébé

G1	Vous arrive-t-il de consommer des plats contenant du niébé ? 1-Oui 0-Non Si non, se reporter à G2 puis arrêter l'entretien	/_/_
----	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------

Annexe 1 : Questionnaire de l'enquête FFQ

Enquête de consommation du niébé dans les communes d'Adjohoun et Allada
Université d'Abomey –Calavi et IRD – 2019

	<i>Si oui, se reporter à G3 et continuer l'entretien</i>	
G2	Pourquoi ne consommez-vous pas de niébé ? Donnez la raison principale 1 - Trop long à préparer 2 -Trop cher à préparer 3-je n'aime pas le goût 4 – Problème de stockage de la graine 5- Inconfort digestif 6-Autre (préciser)	/_-/
G3	Habituellement, consommez-vous ...	
	G3.1. Adowè ? 1. Oui, je consomme 0. Non, je ne consomme pas	/_-/
	G3.2. Ata ? 1. Oui 0. Non	/_-/
	G3.3. Ata doco ? 1. Oui 0. Non	/_-/
	G3.4. Ataclè ? 1. Oui 0. Non	/_-/
	G3.5. Abla ? 1. Oui 0. Non	/_-/
	G3.6. Abobo ? 1. Oui 0. Non	/_-/
	G3.7. Djongoli ? 1. Oui 0. Non	/_-/
	G3.8. Atassi ? 1. Oui 0. Non	/_-/
	G3.9. Vêyi ? 1. Oui 0. Non	/_-/
G4	Avez-vous consommé du niébé au cours de cette dernière semaine ? 1-Oui 0-Non <i>Si non se reporter à G5</i> <i>Si oui se reporter à G6</i>	/_-/
G5	Si non, pourquoi ? 1 - Difficulté à mâcher 2 - Troubles digestifs 3- Trop cher 4 - Pas disponible sur les marchés 5 - Plus de stock à la maison 6. Je n'aime pas le niébé 7. Quelqu'un d'autre dans le ménage n'aime pas le niébé 8. Autre, précisez :	/_-/
G6	Et à quelle fréquence en consommez-vous habituellement dans un mois ? 1 - 4 fois par mois et plus 2 - 1 à 3 fois par mois 3 - Moins d'1 fois par mois	/_-/

IX- Consommation des plats à base de niébé au cours du dernier mois

8

Enquête de consommation du niébé dans les communes d'Adjohoun et Allada
Université d'Abomey –Calavi et IRD – 2019

G7 à G10	G7 Avez-vous consommé du [nom du plat] au cours de ce dernier mois ? 1-Oui 0-Non <i>Si non, répondre à G8, puis passer au plat suivant (G7)</i> <i>Si oui, passer à la question G9</i>	G8 Si non, pour quelle raison ? 1 - Trop long à préparer 2 - Trop cher à préparer 3 - Je n'aime pas 4 - Périssabilité (le plat ne se conserve pas) 5 - Cela me donne des problèmes digestifs 6 - Autre (préciser) : <i>Si 1, passer au plat suivant (G7)</i> <i>Si 2 ou 3, aller en G10,</i>	G9 Comment était cette consommation du mois dernier par rapport au reste de l'année? 1-comme d'habitude 2- moins que d'habitude 3- plus que d'habitude <i>Si 1, passer au plat suivant (G7)</i> <i>Si 2 ou 3, aller en G10,</i>	G10 Quand vous étiez jeune et que vous habitez chez vos parents, consommiez-vous ce plat ? 1-Non, jamais 2 -Oui, mais moins souvent que maintenant 3 - aussi souvent que maintenant 4 - Plus souvent que maintenant 5 - Je ne me souviens pas
Adowè				
Ata				
Ata doco				
Atassi				
Abla				
Abobo				
Vêyi				
Ataclè				
Djongoli				
Autre plat à base de niébé				

X- Consommation des plats à base de niébé au cours des 7 derniers jours

9

Annexe 1 : Questionnaire de l'enquête FFQ

<i>Enquête de consommation du niébé dans les communes d'Adjohoun et Allada Université d'Abomey –Calavi et IRD – 2019</i>					
G11-G13 G11. Avez-vous consommé au cours des 7 derniers jours de ... ? (Citez chaque plat) 1-Oui 0-Non (si non, → G14)	G12. Combien de fois dans la semaine ? 1 - 1 fois 2 - 2 fois 3 - 3 fois 4- 4 fois 5 - 5 fois 6 - 6 fois 7-7 fois ou plus	G13. Quantité consommée habituellement (Catalogue photo) 1 - moins que portion 2 2 - comme portion 2 3 - entre portions 2 et 4 4 - comme portion 4 5 - entre portion 4 et 6 6 - comme portion 6 7 - entre portion 6 et 8 8 - comme portion 8 9 -Plus que portion 8	G14. Pour quelles raisons ne consommez-vous pas ce plat ? (Plusieurs réponses possibles) 1 -je n'aime pas le goût 2 - ça me donne des troubles digestifs 3- Difficile à trouver 4- trop long à préparer 5. Trop cher à préparer 6. C'est mauvais pour la santé..... 7-Autre (préciser) :		
				Adowè	
				Ata	
				Ata doco	
				Atassi	
				Abla	
				Abobo	
				Véyi	
				Attaclè	
				Djongoli	
Autre plat à base de niébé					
XI-Informations supplémentaires sur la consommation des plats <p>Ces questions seront uniquement posées pour les plats consommés au cours de la semaine précédant l'enquête c'est-à-dire les plats auxquels l'enquêté a répondu « Oui » à la question G11.</p>					
G15 – G19	G15 La dernière fois que vous avez consommé ce plat, Où l'avez-vous consommé ? 1 - A domicile 2 - Chez des amis/famille	G16 La dernière fois que vous avez consommé ce plat, où avait-il été préparé ? 1 - A mon domicile	G17. Quelle variété avait été utilisée pour préparer ce plat ? 1 - Niébé blanc 2 - Niébé rouge 3. Niébé noir 4 - Autre variété de niébé	G18 Quelles contraintes rencontrez-vous lors de la préparation du (nom du plat) ? (Plusieurs réponses possibles) 1-Plat trop cher à préparer	G19 Si le plat est trop cher, qu'est-ce qui justifie ce prix ? (Plusieurs réponses possibles) 1-Ingrédients utilisés
XII- Approvisionnement					
<i>Enquête de consommation du niébé dans les communes d'Adjohoun et Allada Université d'Abomey –Calavi et IRD – 2019</i>					
G20 Habituellement, est-ce que tous les membres du ménage ont l'habitude de consommer ce plat ? 1-Oui 2-Non Si oui, allez à G23					
G21 Si non, de quelle(s) tranche(s) d'âge sont les personnes qui n'en consomment pas ? (Plusieurs réponses possibles) 1- Moins de 2 ans 2- 2 - 9 ans 3- 10 -18 ans 4- 19-65 ans 5- 66 ans et plus 6- Ce n'est pas lié à l'âge					
G22 Pour quelle(s) raison(s) n'en consomment-elles pas ? (Plusieurs réponses possibles) 1 –Elles n'aiment pas le goût 2 – Cela leur cause des troubles digestifs 3- Elles préfèrent d'autres aliments 4 - Autre (préciser) : 5 – Ne sait pas					

*Enquête de consommation du niébé dans les communes d'Adjohoun et Allada
Université d'Abomey –Calavi et IRD – 2019*

G23	Lorsque le plat de niébé est préparé à domicile, où vous fournissez-vous ? 1- Producteur 2- Auto-approvisionnement 3 – Marché 4 – Epicerie 5 – Don 6 - Troc 6 - Aide alimentaire 7-Autre (précisez) : 8- Ne sait pas	/ /
G24	A quelle fréquence vous approvisionnez-vous ? 1 - Achat occasionnel 2 - Au jour le jour 3 - Achat en grande quantité pour le stocker	/ /

XIII- Perception sur la consommation du niébé

G25	Selon vous, est-ce que la population de votre commune consomme plus, moins ou autant de niébé que la population de Cotonou ? 1 – Plus 2 – Moins 3 – Autant 4 – Ne sait pas	/ /
G26	Selon vous, consommez-vous plus, moins ou autant de niébé que les habitants de votre commune ? 1 – Plus 2 – Moins 3 – Autant 4 – Ne sait pas	/ /
G27	Qu'est-ce qui limite selon vous la consommation du niébé ? (Plusieurs réponses possibles, à numérotter par ordre d'importance) 1-Contraintes liées à la préparation 2- La graine ne se conserve pas bien 3- Les plats de niébé ne se conservent pas bien 4- Le niébé est trop cher 5- Le niébé cause des problèmes digestifs 6-Autre (précisez) :	/ / / / / / / / / / / /
G28	Si vous rencontrez des problèmes digestifs lorsque vous consommez des plats à base de niébé, lesquels ? (Plusieurs réponses possibles) 1-Douleurs abdominales, ballonnements 2-Flatulences, gaz 3-Constipation 4-Diarrhée 5-Autre (précisez) : 6- Ne sait pas	/ / / / / / / / / / / /
G29	Pour quels types de plat ressentez-vous ces troubles ?	
	G29.1 Adowè 1 Oui 2 Non	/ /
	G29.2 Ata 1 Oui 2 Non	/ /

*Enquête de consommation du niébé dans les communes d'Adjohoun et Allada
Université d'Abomey –Calavi et IRD – 2019*

G29.3 Ata doco	1 Oui	2 Non	/ /
G29.4 Atadè	1 Oui	2 Non	/ /
G29.5 Abla	1 Oui	2 Non	/ /
G29.6 Atassi	1 Oui	2 Non	/ /
G29.7 Vêyi	1 Oui	2 Non	/ /
G29.8 Abobo	1 Oui	2 Non	/ /
G29.9 Djongoli	1 Oui	2 Non	/ /

Annexe 2 : Guide d'entretien des discussions de groupe



Guide d'entretien pour la réalisation des groupes de discussions focalisées

Ce guide d'entretien aborde les thématiques suivantes :

- Aliments locaux et consommation alimentaire par groupe socio-économique
 - Consommation des légumineuses en général
 - Consommation du niébé
 - Plats de niébé et Evolution de leur consommation dans le temps (Enfance vs Age adulte)
 - Plats de niébé et Consommation milieu urbain vs rural
 - Freins à la consommation du niébé

Pour faciliter au modérateur à mieux conduire la discussion quelques questions ont été préparées à l'avance. Donc au cours de chaque entrevue, le modérateur aura pour rôle de poser des questions de relances en fonction des réponses données par les participants.

I- Présentation

Modérateur :

Rapporteur:

Nom de la zone d'étude :

Identification de la fiche :

1. *Liste des participants au focus group

II- Aliments locaux et consommation alimentaire par groupe socio-économique

1. Quels sont les principaux plats que vous et votre entourage consommez les plus fréquemment? Selon vous, pourquoi ces plats sont fréquemment consommés ?

Pour la question suivante, le modérateur se limitera aux 4 principaux plats les plus consommés.

2. Le plat « *Nom du plat* » est-il consommé par tout le monde ou existe-t-il des différences selon :

- L'âge (jeune vs adulte) ? Si il existe une différence, l'animateur demandera : Comment expliquez-vous cela ?

- Le niveau d'aisance (ménages défavorisés vs ménages aisés)? S'il existe une différence, l'animateur demandera : Comment expliquez-vous cela ?

III- Consommation des légumineuses en général

Nous avons constaté que les graines de type haricot comme : Soja, néré, doyiwé, voandzou, niébé et arachide, sont les plus connues dans votre zone :

- Connaissez-vous d'autres graines du même type ne figurant pas dans la liste et qui sont consommés par votre entourage? Si oui, citez-les.
- Pourriez-vous les classer par ordre d'importance de consommation? Le chiffre 1 correspondant à la légumineuse la plus consommée.
- Comment expliquez-vous cette différence de consommation entre les légumineuses ?

Nous allons maintenant focaliser notre discussion sur la légumineuse de notre étude : le niébé.

IV- Consommation du niébé en général

- Quel avantage ou quel inconvénient la consommation du niébé présente pour la santé ?
- Que fait la consommation du niébé rouge pour la santé ?
- Que fait la consommation du niébé blanc pour la santé ?
- Que pensez-vous du goût du niébé blanc comparé au goût du niébé rouge ?
- Les utilisations sont-elles les mêmes pour ces deux variétés lors de la préparation à la cuisine ?
- En cas de « NON » à la question précédente, quelles variétés sont préférées pour quels types de plat et pourquoi ?
- Selon vous, y a-t-il une différence de consommation de niébé entre l'Homme et la Femme ? si oui, qui en consomme le plus? Comment pouvez-vous expliquer cela ?
- Selon vous, entre les jeunes et les adultes, qui consomment le plus le niébé ? Comment pouvez-vous expliquer cela ?
- Est-ce que vos grands-parents consommaient du niébé ? plus que la population actuelle ? autant ? ou moins ?

V- Plats de niébé et Evolution de leur consommation dans le temps

- Quels sont les plats à base de niébé que vous consommez très fréquemment ?
- Pourquoi consommez-vous plus ces plats par rapport aux autres plats de niébé ? L'animateur pourra donner des exemples en citant les autres plats de niébé de liste suivante³ qui n'ont pas été évoqués par les participants.

Notre étude s'intéresse aux beignets et ragouts de niébé. Pour les questions 15 à 18, l'animateur citera donc chacun des plats suivants : Abobo, Ata, Véyi et Ata doco.

- Quels sont les critères de qualité qui sont généralement recherchés pour le plat « Nom du plat » au niveau :

³ Liste des plats de niébé : Atassi, Ata, Adowè, Abobo, Djongoli, Abla, Véyi, Ata doco, Attaciè.

- du goût,
- de la texture,
- de l'apparence ?

- Pour le plat « Nom du plat », Noter chaque descriptif de qualité précédemment cité pour le goût, la texture et l'apparence par ordre d'importance. La notation se fera de la manière suivante : 1= qualité peu recherchée, 2=Qualité moyennement recherchée 3= Qualité très recherchée.
Exemple : Si pour le Ata, les critères de qualité pour la texture sont « croutillant » et « pas trop dur », les notes pourraient être 3 pour « croutillance » et 2 pour « pas trop dur ».
- Pour le plat « nom du plat » : Quels sont les changements que vous avez pu constater dans la manière de préparer par rapport à ce que faisaient vos parents, et vos grands-parents? A quoi pourraient être dus ces changements ou comment pourriez-vous les expliquer?
Pour la question 20, orienter aussi la discussion sur l'évolution de la consommation. C'est-à-dire les différences entre avant et après sur les quantités, les fréquences et formes.

VI- Plats de niébé et Consommation en milieu urbain vs milieu rural

- Selon vous, entre les populations rurales et les populations des villes telles que la ville de Cotonou, qui consomme le plus de niébé ? Comment expliquez-vous cela ?

Les questions suivantes seront posées successivement pour les plats : Ata, Abobo, Ata doco, et Véyi.

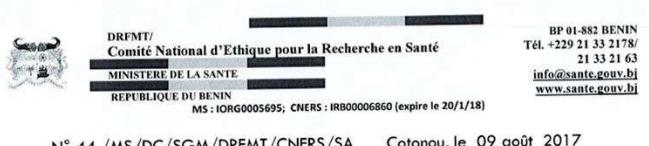
- Quels sont les aliments qui sont généralement consommés avec le plat « Nom du pat » dans votre entourage?
- Pensez-vous que ces accompagnements soient les mêmes dans les villages ? Cette question sera posée si l'étude se déroule à Cotonou.

Une reformulation de la question sera faite si l'étude se déroule à Adjohoun ou Allada :
- Pensez-vous que ces accompagnements soient les mêmes à Cotonou ?

VII- Freins à la consommation du niébé

- Quelles sont selon vous les raisons qui pourraient empêcher la consommation du niébé? Si un participant cite une raison, interroger les autres participants pour voir s'ils sont d'accord et si cette raison fait consensus ou pas.
- En utilisant les raisons énumérées, nous allons faire un classement par ordre d'importance.

Annexe 3 : Avis du comité national d'éthique pour la recherche en santé du Bénin (CNERS)

Etude réalisée à Cotonou**La présidente****A**

Madame MOUQUET-RIVIER Claire
 Monsieur HOUNHOUIGAN D.
 Joseph
COTONOU

Objet : Avis éthique favorable n° 29 du 28 /07/2017
 et autorisant la mise en œuvre de votre recherche

Madame et monsieur,

Le Comité National d'Ethique pour la Recherche en Santé (CNERS) du Bénin, a l'honneur de vous adresser l'avis éthique concernant votre protocole de recherche :

- dont le titre actuel est : « *Diagnostic de la consommation du niébé en zone urbaine (Cotonou, Bénin) afin d'identifier les freins à sa consommation et les attentes des consommateurs et d'évaluer secondairement la contribution du niébé à la couverture des besoins nutritionnels théoriques chez les adultes* ».
- étudié le 29 juillet 2017, par ses membres dont les noms suivent :

Mesdames 1) GANGBO	Flore	Messieurs 2) GUEDOU	Fernand
3) OLODO INOUSA	Sarafatou	4) AHOUSSINOU	Clement
5) AKINSHOLA	Amélie	6) HOUNSA	Assomption
Messieurs 7) AFFODJI	Jules	8) LIGALI	Isiaka
9) ZOMONTO	Olivier	10) KENDE DAHOUE	Antoine E.

• sur la base des documents soumis, revus et approuvés

- Protocol de recherche
- Résumé du protocole
- Lettre d'engagement
- Annexe 1 : Accord de financement du projet Icowpea
- Annexe 2 : liste des quartiers sélectionnés aléatoirement au sein de chaque arrondissement
- Annexe 3 : catalogue photo, exemple de Atta
- Annexe 4 : questionnaire sur la consommation des légumineuses et du niébé

1

- Annexe 5 : guide de l'enquêteur
- Annexe 6 : note d'information à l'intention des participants
- Annexe 7 : formulaire de consentement
- Chronogramme des activités
- Budget prévisionnel
- Curriculum vitae :
 - HOUNHOUIGAN D. Joseph
 - MOUQUET-RIVIER Claire
 - ICARD-VERNIERE Christèle
 - MADODE Yann Emeric
 - HEMERY Youna-Morgane

• ainsi que sur la base de l'avis scientifique fourni par l'expert sollicité par le CNERS : LANDAIS Edwige

Après avoir validé globalement les aspects scientifiques et évalué les aspects éthiques centrés sur : les bénéfices attendus pour la santé des participants à la recherche et ainsi que sur la qualité des informations transmises en vue de l'obtention d'un consentement libre et éclairé, le CNERS a émis un **Avis éthique favorable n°29 du 28 /07/2017**.

Le présent avis éthique favorable est exécutoire et vous autorise à mettre en œuvre la recherche ci-dessus intitulée.

Il est valable pour une durée d'un (01) an à compter de sa date de signature. Passé ce délai, vous êtes tenu de soumettre votre protocole à une nouvelle ré-évaluation du CNERS.

Par ailleurs, le CNERS vous demande de :

- l'informer de toute nouvelle information/ modification, qui surviendrait à une date ultérieure à cette approbation-ci et qui impliquerait des changements dans le choix des participants à la recherche, dans la manière d'obtenir leur consentement, dans les risques encourus ou tout événement indésirable survenant dans le cadre du déroulement de cette recherche.
- utiliser les documents qu'il a validé;
- faire signer au participant, le formulaire de consentement, en deux exemplaires, dont l'un lui sera remis et l'autre, conservé dans vos dossiers ;
- lui adresser un rapport, au terme de la validité de cet avis éthique.

Tout en vous souhaitant plein succès dans la réalisation de votre recherche, le CNERS vous prie de recevoir Madame et monsieur, ses salutations les meilleures.

La présidente

Comité National d'Ethique
 pour la Recherche en Santé
 Le Président

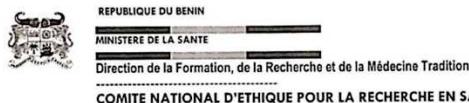
Professeur Flore GANGBO

Page 2 sur 2

Avis éthique favorable N° 29 du 28 juillet 2017
 Comité National d'Ethique pour la Recherche en Santé
 site web : www.ethique-sante.org courriel : contact@ethique-sante.org

2

Etude réalisée dans les zones rurales



N° 43 /MS/DC/SGM/DRFMT/CNERS/SA

Cotonou, le 31 mai 2019

La présidente

A

Madame Claire Mouquet Rivier
Monsieur Hounhouigan D Joseph
COTONOU



**Objet : Avis éthique favorable n° 14 du 10 avril 2019
et autorisant la mise en œuvre de votre recherche**

Madame et monsieur,
Le Comité National d'Ethique pour la Recherche en Santé (CNERS) du Bénin, a l'honneur de vous adresser l'avis éthique concernant votre protocole de recherche :

- dont le titre actuel (suite aux modifications du CNERS) est : **Diagnostic de la consommation du niébé dans deux communes rurales « Adjohoun et Allada » pour une étude comparative avec la ville de Cotonou sur l'histoire de la consommation des plats à base de niébé et ses motivations et pour l'évaluation de leurs apports nutritionnels chez les adultes.**

- étudié le 10 avril 2019, par ses membres dont les noms suivent :

Mesdames	1) GANGBO Flore	Messieurs	2) GUEDOU Fernand
3) ALE HACOU Charlotte	4) BOKO Martial		
5) AKINSHOLA Amélie	6) HOUNSA Assomption		
7) HOUNNOU TCHABI Sidonie	8) HOUSSOU Paul Ferdinand		
9) D'ALMEIDA Thérèse	10) MARTIN -CORREA Louis - Jacques		
Monsieur 11) OKRY Magloire	12) CHAFFA Christian		

- sur la base des documents soumis, revus et approuvés:

- a) Protocole de recherche
- b) Résumé
- c) Questionnaire de l'enquête sur la consommation du niébé par les adultes de Adjohoun et Allada, Bénin
- d) Guide de l'enquêteur
- e) Guide de compréhension du questionnaire
- f) Extrait du catalogue photo
- g) Note d'information à l'intention des participants à l'enquête FFQ
- h) Note d'information à l'intention des chefs de ménage
- i) Formulaire de consentement à l'intention du chef de ménage
- j) Formulaire de consentement à l'intention des restauratrices
- k) Accord de financement du projet Transnut-niébé

1

- l) Guide d'entretien pour la réalisation des groupes de discussions focalisées
- m) Liste des quartiers sélectionnés aléatoirement pour l'enquête en milieu rural
- n) Validation des fréquences de consommation avec différents rappels de 24h
- o) Questionnaire pour la validation du recueil des fréquences de consommation des plats de niébé (Cotonou, Allada, Adjohoun)
- p) Engagement de l'investigateur et autres chercheurs
- q) Avis éthique favorable n°29 du 28/07/2017
- r) Chronogramme des activités
- s) Budget prévisionnel d'enquête
- t) Curriculum vitae Mouquet-Rivier Claire ; Hounhouigan D Joseph
- ainsi que sur la base des avis scientifique fournis par messieurs :
- Eric Olivier Christian VERGER
- Waliou AMOUSSA HOUNKPATIN experts sollicités par le chercheur

Après avoir validé globalement les aspects scientifiques et évalué les aspects éthiques centrés sur : les bénéfices attendus pour la santé des participants à la recherche et ainsi que sur la qualité des informations transmises en vue de l'obtention d'un consentement libre et éclairé, le CNERS a émis un Avis éthique favorable n° 14 du 10 avril 2019.

Le présent avis éthique favorable est exécutoire et vous autorise à mettre en œuvre la recherche ci-dessus intitulée.

Il est valable pour une durée d'un (01) an à compter de sa date de signature. Passé ce délai, vous êtes tenu de soumettre votre protocole à une nouvelle ré-évaluation du CNERS.

Par ailleurs, le CNERS vous demande de :

- 1) l'informer de toute nouvelle information/ modification, qui surviendrait à une date ultérieure à cette approbation-ci et qui impliquerait des changements dans le choix des participants à la recherche, dans la manière d'obtenir leur consentement, dans les risques encourus ou tout événement indésirable survenant dans le cadre du déroulement de cette recherche.

Le CNERS doit, en effet, dans ces cas, ré-évaluer et donner une nouvelle approbation avant l'entrée en vigueur desdites modifications

- 2) utiliser les documents qu'il a validés;
- 3) faire signer au participant, le formulaire de consentement, en deux exemplaires, dont l'un lui sera remis et l'autre, conservé dans vos dossiers ;
- 4) lui adresser un rapport, au terme de la validité de cet avis éthique.

Le CNERS, se réserve le droit de faire le suivi, de suspendre ou d'arrêter la mise en œuvre de la recherche.

Tout en vous souhaitant plein succès dans la réalisation de votre recherche, le CNERS vous prie de recevoir Madame et monsieur, ses salutations les meilleures.



Prof Flore Armande GANGBO
Présidente du CNERS

Page 2 sur 2

Avis éthique favorable N°14 du 10 avril 2019
Comité National d'Ethique pour la Recherche en Santé
site web : www.ethique-sante.org courriel : contact@ethique-sante.org

2

Annexe 4 : Supplementary material publication1

Table 1S: Association between the consumption of cowpea dishes during the FFQ week and socio-economic and demographic factors in rural areas

Factors	Socio-economic and demographic characteristics (N=576)	Number of respondents per factor	Stews			Doughnuts			Mixed dishes		
			Adowè	Abobo	Véyi	Ata	Ata doco	Ataclè	Abla	Atassi	Djongoli
			35 ²	496 ²	77 ²	122 ²	188 ²	35 ²	85 ²	440 ²	213 ²
Commune	Adjohoun (Reference)	288 ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Allada	288 ¹	0.4	-0.6	-0.3	-0.6	-0.1	1.8*	0.6	-1.4***	-0.4
	Pvalue‡		0.6	0.1	0.5	0.1	0.7	0.02	0.3	<0.001	0.2
Age	<27 years (Reference)	105 ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	27-34 years	119 ¹	1.1	-0.4	0.3	0.9	0.1	-	-0.3	0.6	-0.5
	35-44 years	145 ¹	1.4	-0.4	0.6	1.1	0.6	2.9*	-0.07	-0.1	-0.2
	45-65 years	207 ¹	-1.2	-0.5	0.5	1.2	0.3	0.6	-0.3	-0.6	0.05
	Pvalue‡		0.1	0.8	0.9	0.2	0.6	<0.001	1.0	0.3	0.6
SEI rural area	Low (Reference)	198 ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Middle	202 ¹	2.3**	-0.2	1.0	-0.3	0.4	-1.3	-0.1	-0.6	-0.4
	High	176 ¹	2.6*	-1.2*	-0.01	1.3*	-0.3	-2.4	0.9	-1.3*	-0.5
	Pvalue‡		0.008	0.05	0.2	0.02	0.2	0.3	0.3	0.03	0.4
Sex	Men (Reference)	285 ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Women	291 ¹	-0.9	-0.06	-0.6	-0.6	0.02	-1.2	-0.4	0.1	-0.3
	Pvalue‡		0.2	0.8	0.2	0.1	0.9	0.3	0.5	0.8	0.4
Education	None (Reference)	256 ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Primary school	168 ¹	-0.01	-0.6	0.5	-0.9	-0.07	-1.3	-0.3	-1.2	-0.3
	Secondary school	138 ¹	-0.01	-0.03	-0.2	-0.9	0.06	-0.1	-1.8	-0.6	-0.5
	Higher education	14 ¹	-18.9***	-1.6	-15.1***	-1.7	15.3***	20.0***	0.3	14.7***	0.8
	Pvalue‡		<0.001	0.3	<0.001	0.4	<0.001	<0.001	0.1	<0.001	0.7

Values are estimated coefficients and p-values associated with each parameter. ‡ P-value for association between the consumption of cowpea dishes during the FFQ week and socio-economic and demographic factors (determined by logistic regression). N: Total number of respondents. 1: Number of respondents per group for the different factors. 2: Total number of consumers of each dish during the FFQ week

Table 2S: Association between the consumption of cowpea dishes during the FFQ week and socio-economic and demographics factors in Cotonou

Factors	Socio-economic and demographic characteristics (N=641)	Number of respondents per factor	Stews			Doughnuts			Mixed dishes		
			Adowè	Abobo	Vêyi	Ata	Ata doco	Ataclè	Atassi	Djongoli	Abla
			150 ²	441 ²	142 ²	350 ²	92 ²	38 ²	444 ²	95 ²	30 ²
Age	<27 years (Reference)	171 ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	27-34 years	169 ¹	0.2	0.3	0.3	0.4	1.1	-0.02	-0.2	0.6	2.3**
	35-44 years	139 ¹	0.2	0.2	0.3	0.7*	0.5	-1.0	-0.3	0.2	1.9**
	45-65 years	162 ¹	-0.6	-0.1	0.3	0.4	0.3	0.2	-0.8	0.9	1.2
	Pvalue ≠		0.08	0.6	0.8	0.03	0.1	0.2	0.3	0.1	0.01
SEI rural area	Low (Reference)	200 ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Middle	276 ¹	0.5	0.5*	0.2	0.5	0.4	0.7	0.6	0.6*	0.6
	High	166 ¹	0.7	0.9**	0.5	0.5	1.1	0.6	0.9	-0.3	1.4
	Pvalue ≠		0.2	0.02	0.4	0.1	0.09	0.5	0.1	0.02	0.1
	Sex										
Sex	Men (Reference)	324 ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Women	217 ¹	-0.4	-0.2	-0.4	-0.6**	-0.8*	0.07	-0.08	-0.7*	-0.5
	Pvalue ≠		0.2	0.3	0.1	0.004	0.01	0.9	0.8	0.02	0.3
Education	None (Reference)	101 ¹	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Primary school	177 ¹	0.6	-0.02	-0.2	0.3	0.6	0.4	0.4	-0.2	1.6
	Secondary school	229 ¹	0.5	-0.4	0.3	0.2	-0.02	0.01	0.3	-0.2	2.4*
	Higher education	133 ¹	-0.2	-0.8	-0.5	0.3	-1.0	-0.3	-0.08	-0.4	1.1
	Pvalue ≠		0.1	0.1	0.1	0.8	0.1	0.9	0.6	0.9	0.04

Values are estimated coefficients and p-values associated with each parameter. ≠ P-value for association between the consumption of cowpea dishes during the FFQ week and socio-economic and demographic factors (determined by logistic regression). N: Total number of respondents. 1: Number of respondents per group of different factors. 2: Total number of consumers of each dish during the FFQ week.

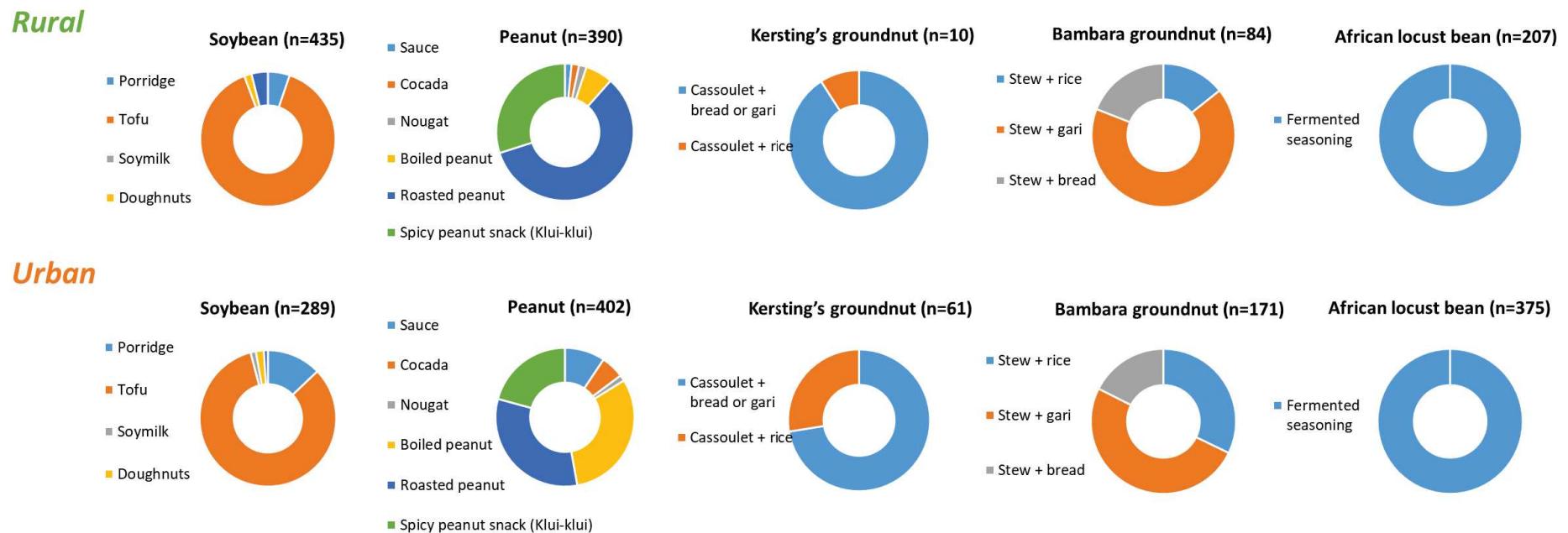


Figure 1S: Consumption forms of legumes in Cotonou and in rural areas (percentages) among FFQ survey participants

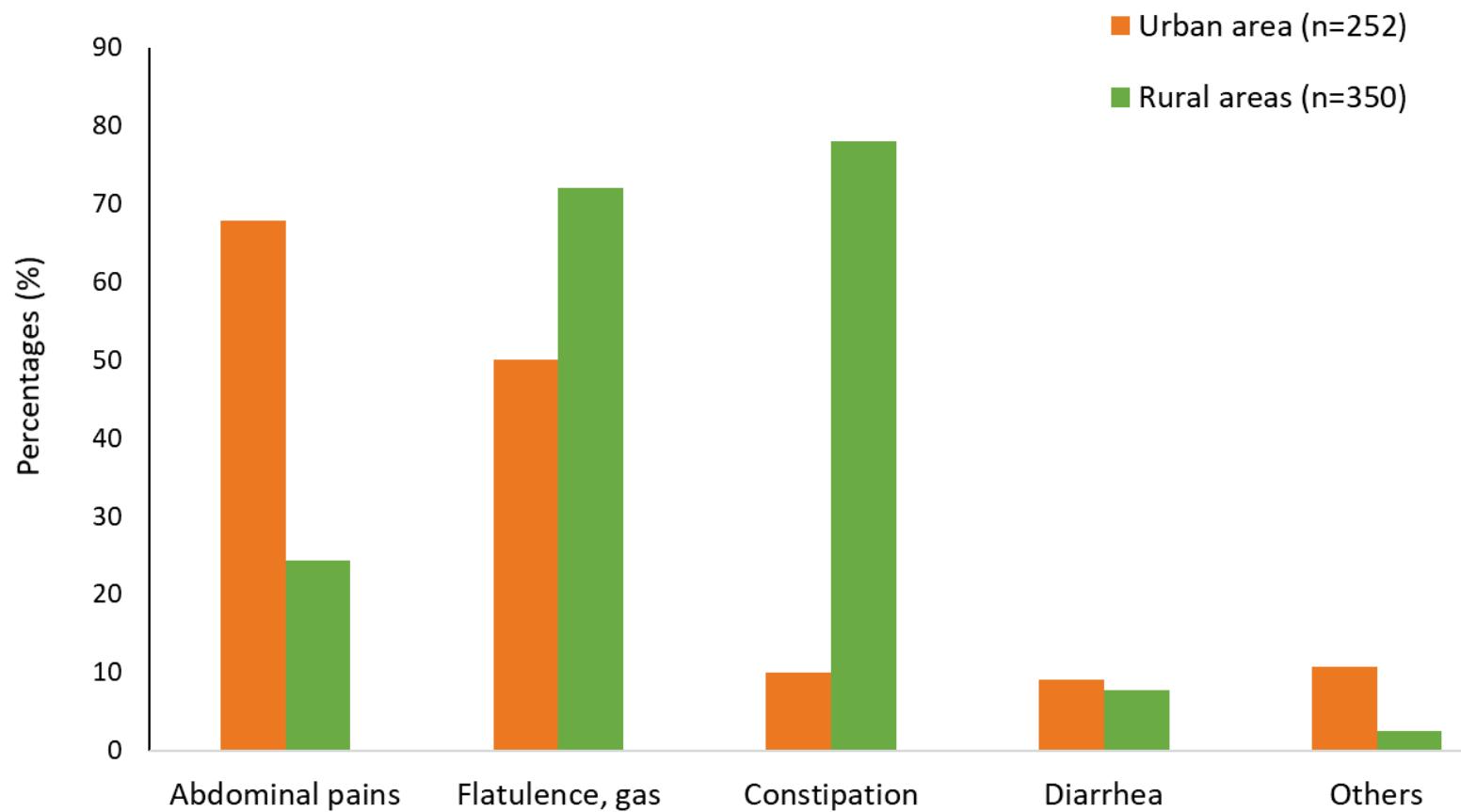


Figure 2S: Proportion of consumers complaining of digestive problems after eating cowpeas

Multiple choices were allowed

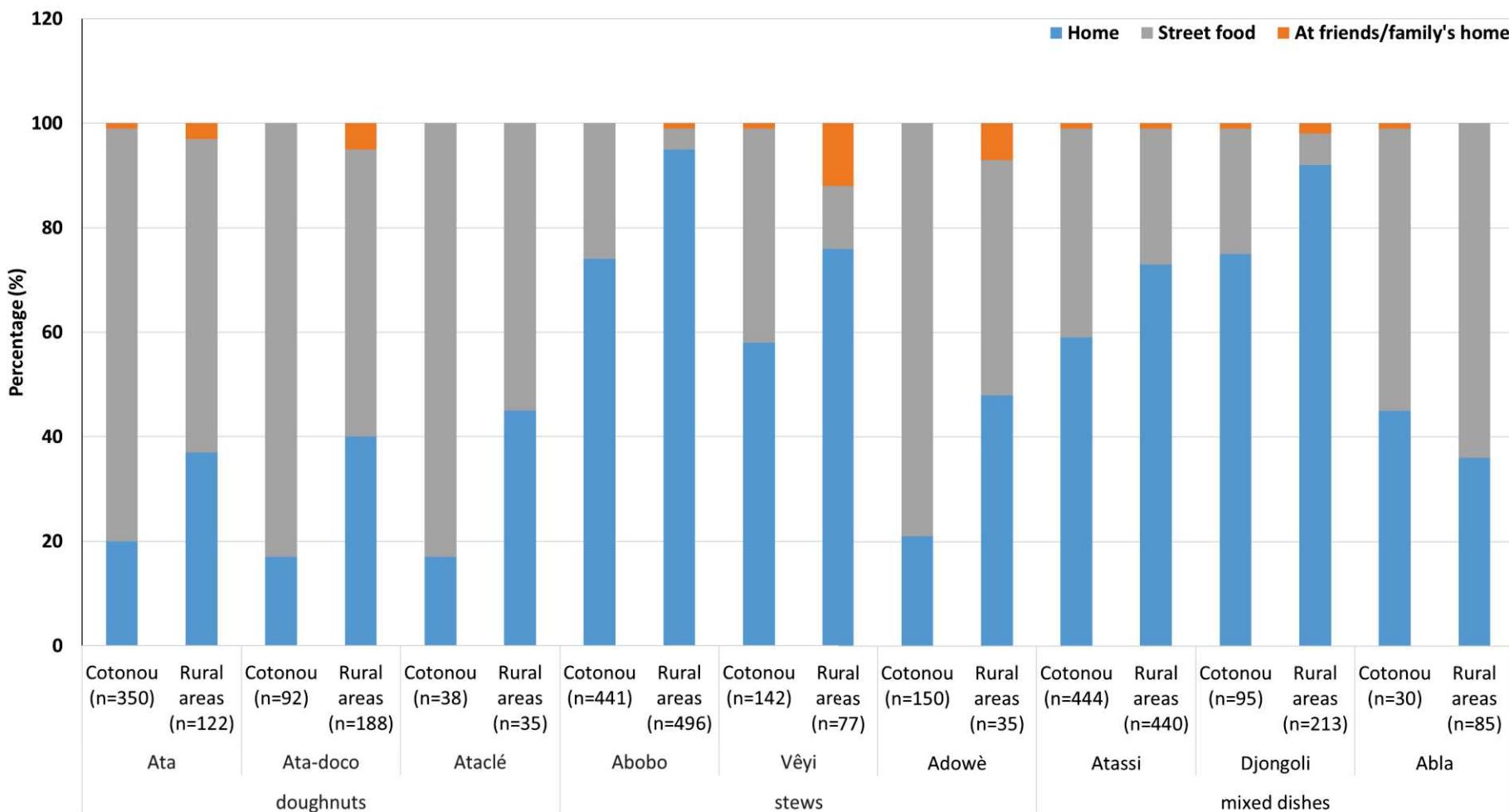


Figure 3S : Place of consumption of by the consumers of each cowpea dishes during the last intake

n: number of respondents, which consumed each cowpea dish during the FFQ week. Values are percentages

Annexe 5 : Supplementary material publication 2

Table 1S: Description of cowpea dishes

	Cowpea-based dishes	Principal ingredients[§]	Description
Mixed dishes	Atassi	Cowpea/Rice (1:5 to 2:7). Cowpea: rice. w/w)	Rice and cowpea cooked in water
	Djongoli	Cowpea/Maize/oil (3:3:1)	Cowpea seeds and maize flour. Sometimes cooked with red oil or palm nuts extract.
	Abla	Maize/Cowpea/Palm nut extract (3:3:4)	Steamed dehulled cowpea paste with red oil/palm nuts extract and some cowpea seeds
Stews	Abobo	Cowpea	Boiled cowpea with very softened seeds (reduction of firmness) after cooking and containing more water.
	Vêyi	Cowpea	Boiled cowpea with absence of water after cooking
	Adowè	Dehulled cowpea	Dehulled cowpea cooked in water.
Doughnuts	Ata	Dehulled cowpea	Fried cowpea paste made with dehulled seed
	Ata doco	Cowpea	Fried cowpea paste made with whole seed
	Ataclè	Cowpea	Whole cowpea paste fried two times and immersed in oil after frying

§: Information collected from (Madode et al.. 2011).

Table 2S: Reference values used to calculate the nutritional contribution

Type of nutrient	Nutrients	Women	Men	Mean [†]
Energy	Energy (kcal)	2200	2800	2500
Macronutrients	Protein (g)	54	54	54
	Fibre (g)	30	30	30
Minerals	Ca (mg)	1000	1000	1000
	Mg (mg)	220	260	240
	K (mg)	3510	3510	3510
	Zn ¹ (mg)	9,8	14	11,9
	Fe ² (mg)	58,8	27,4	43,1
Vitamins	Folate (µg)	400	400	400
	Thiamine (mg)	1,1	1,2	1,15

[†]: Average values of RNIs for women and men. These values were used to calculate the contribution to RNIs. 1: Values are RNIs for a dietary zinc bioavailability of 15%. 2: Values are RNIs for a dietary iron bioavailability of 5%.

Table 3S: Food atlas and FFQ validation using spearman correlation and Bland-Altman test

Cowpea dishes		Food Atlas validation			FFQ Validation				
		Weight record Vs 24h –recall			FFQ vs Mean of 24h-recalls				
		Spearman correlation	Bland and Altman test (ratio %)		Spearman correlation	Bland and Altman test (ratio %)			
Doughnuts	Ata	0.8	52	138	84	0.8	59	152	95
	Ata doco	0.7	41	134	74	0.7	40	165	82
	Ataclè	0.8	92	178	128	§	§		
Stews	Abobo	0.5	45	258	108	0.4	32	282	96
	Vêyi	0.6	65	400	162	0.7	39	233	95
	Adowè	0.2	29	195	75	0.6	23	191	66
Mixed dishes	Atassi	0.4	47	208	99	0.4	39	228	94
	Djongoli	0.4	39	228	94	0.6	32	234	86
	Abla	0.6	45	131	77	§		§	

LLOA: Lower limit of agreement at 95% confidence interval

ULOA: Upper limit of agreement at 95% confidence interval

§: Sample size was not enough to perform the analysis.

Table 4S: Influence of socio-economic and demographic factors on daily quantities consumed during the 7 previous days

Area	Factors	Cowpea-based dishes (g, FW)									Cowpea seeds (g, FW)
		Adowè	Ata	Abla	Ataclè	Abobo	Atassi	Djongoli	Véyi	Ata-doco	
Rural	Sample size	35	122	85	35	496	440	213	77	188	
	Commune	Adjouhou (reference)									
		Allada	6.1	12.8 (0.01)	5.0	6.0	-28.1 (0.002)	-6.5	-2.8	4.4	2.8
	Education	None (reference)									
		Primary school	4.0	4.9	4.0	15.9	-9.1	-37.2	6.1	3.4	1.0
		Secondary school	19.7	12.2	-14.7	24.2	-5.9	-8.8	32.7	-7.1	-3.2
		University	-	21.4	-3.3	-7.4	24.6	-27.1	102.5 (0.03)		-10.3
	Age	<27 years (reference)									
		27-34 years	-13.6	-11.9	-31.2		11.6	-35.5 (0.02)	7.8	33.0	-2.3
		35-44 years	-4.3	-7.1	-0.4	-0.4	9.4	-40.6 (0.005)	8.0	18.3	-2.0
		45-65 years	9.6	-2.8	-4.6	-23.6	2.9	-70.8 (<0.001)	31.9	15.0	-9.0
	Sex	Men (reference)									
		Women	23.1 (0.01)	-0.2	-17.6 (0.03)	0.5	-13.0	-22.0 (0.02)	-0.06	-22.3	-8.3
	SEI 2	Low (reference)									
		Middle	0.02	-9.7	0.4	7.3	0.2	12.2	-6.3	-2.2	-6.6
		High	-4.8	-13.2	-4.2	5.0	-20.7 (0.05)	-1.1	-51.3 (<0.001)	-9.7	-5.5
Urban	Sample size	150	350	30	38	441	444	95	142	92	
	Education	None (reference)									
		Primary school	17.6	24.2 (0.002)	185.7 (0.003)	22.0	2.0	-3.2	14.2	18.8	-62.1 (0.002)
		Secondary school	1.2	5.8	21.0	5.7	-2.1	2.6	-1.2	-11.5	14.1
		University	-10.0	11.0	-13.2	-31.6	5.4	0.9	-13.9	-3.5	-12.1
	Age	<27 years (reference)									
		27-34 years	2.5	1.4	-15.5	-32.2	10.0	-10.3	2.0	5.3	33.5
		35-44 years	3.2	-14.8	5.4	-53.2 (0.004)	7.8	-14.8	7.9	10.4	31.2
		45-65 years	0.4	-12.4	-49.9	-54.1 (0.01)	3.7	-17.0	8.8	1.1	21.1
	Sex	Men (reference)									
		Women	-4.4	-12.0 (0.03)	25.9	35.9 (0.01)	-49.1 (<0.001)	-18.0 (0.02)	-4.3	22.2 (0.01)	-11.2
	SEI 1	Low (reference)									
		Middle	9.6	11.7	56.1	-28.3	-1.0	-21.2	-12.8	3.8	41.1 (0.02)
		High	15.6 (0.04)	17.3 (0.03)	-0.2	8.6	-9.1	-27.4 (0.02)	-30.5 (0.03)	2.2	20.6

SEI 1: Socio-economic index in the urban area. SEI 2: Socio-economic status in the rural areas. Values are GLM coefficients and into brackets are the p-value with significance level set at 5%.

Table 5S: Comparison of the nutrition composition of cowpea dishes sampled at different selling places (100g of edible portion)

Dishes	Producers	Protein (g)	Fat (g)	Available carbohydrate (g)	Ash (g)	Energy (Kcal)	Ca (mg)	Fe (mg)	Mg (mg)	Zn (mg)	K (mg)	Folate (µg)	Thiamin (µg)
Abobo	<i>P</i> -value	<0.001	<i>Ns</i>	<0.001	<0.001		0.02	0.004	0.03	0.04	0.05	0.02	<0.001
	P1	7.1 ± 0.1	0.5 ± 0.0	17.2 ± 0.0	1.4 ± 0.0	113 ± 0	34.5 ± 2.2	1.6 ± 0.0	48.6 ± 1.7	1.1 ± 0.1	333.5 ± 14.8	53.7 ± 0.2	43.1 ± 1
	P2	6.0 ± 0.1	0.5 ± 0.0	14.3 ± 0.0	1.3 ± 0.0	97 ± 0	23.2 ± 2.4	1.0 ± 0.1	32.7 ± 4.2	0.8 ± 0.1	245.7 ± 31.6	61.1 ± 4.4	58.8 ± 2
	P3	5.7 ± 0.1	0.6 ± 0.0	11.3 ± 0.1	2.0 ± 0.0	85 ± 0	33.2 ± 1.8	1.6 ± 0.0	36.9 ± 2.8	0.7 ± 0.0	236.6 ± 22.3	53.0 ± 2.1	28.7 ± 0
Abla	<i>P</i> -value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001		0.01	<0.001	<i>ns</i>	0.01	<0.001	<0.001	0.02
	P1	4.3 ± 0.0	11.3 ± 0.0	16.0 ± 0.0	1.5 ± 0.0	193 ± 0	27.1 ± 0.8	1.9 ± 0.0	41.0 ± 1.1	0.8 ± 0.0	204.3 ± 6.8	59.1 ± 3.8	57.6 ± 1
	P2	4.1 ± 0.0	8.3 ± 0.1	14.2 ± 0.1	1.4 ± 0.0	158 ± 0	25.5 ± 0.3	5.1 ± 0.2	38.8 ± 0.4	0.7 ± 0.0	193.9 ± 0.7	41.9 ± 4.1	42.3 ± 2
	P3	2.5 ± 0.0	11.2 ± 0.1	10.5 ± 0.1	0.9 ± 0.0	163 ± 0	22.5 ± 0.6	1.9 ± 0.0	38.7 ± 1.2	0.6 ± 0.0	101.8 ± 4.9	20.0 ± 3.2	50.9 ± 3
Adowè	<i>P</i> -value	<0.001	<0.001	<0.001	0.01		0.002	0.04	0.03	0.01	0.02	<0.001	<0.001
	P1	7.4 ± 0.0	0.2 ± 0.0	16.2 ± 0.1	1.5 ± 0.0	106 ± 0	25.5 ± 1.2	1.3 ± 0.1	39.5 ± 1.3	1.0 ± 0.0	253.7 ± 11.6	57.2 ± 2.2	47.9 ± 0
	P2	4.8 ± 0.2	0.5 ± 0.0	10.7 ± 0.2	1.5 ± 0.0	76 ± 0	17.5 ± 1.1	0.9 ± 0.1	31.6 ± 1.9	0.7 ± 0.0	220.4 ± 15.0	45.8 ± 3.5	2.2 ± 0
	P3	6.7 ± 0.1	0.6 ± 0.0	14.1 ± 0.0	1.3 ± 0.0	99 ± 0	34.1 ± 1.6	1.0 ± 0.1	39.3 ± 1.9	1.0 ± 0.0	299.2 ± 14.2	92.4 ± 12	35.1 ± 0
Atassi	<i>P</i> -value	0.02	<0.001	<0.001	<0.001		0.01	<0.001	0.01	0.02	0.01	<0.001	<0.001
	P1	2.9 ± 0.0	1.1 ± 0.1	24.7 ± 0.1	1.1 ± 0.0	126 ± 1	7.0 ± 0.8	0.5 ± 0.0	18.4 ± 1.4	0.5 ± 0.0	123.2 ± 9.7	11.6 ± 1.6	35.1 ± 0
	P2	2.9 ± 0.0	0.2 ± 0.0	23.1 ± 0.0	0.9 ± 0.0	111 ± 0	11.0 ± 0.6	0.2 ± 0.0	9.1 ± 0.5	0.3 ± 0.0	65.4 ± 4.1	9.1 ± 0.3	28.3 ± 0
	P3	3.1 ± 0.1	0.9 ± 0.0	23.3 ± 0.1	1.1 ± 0.0	119 ± 0	6.5 ± 0.4	0.4 ± 0.0	12.8 ± 0.8	0.3 ± 0.1	82.6 ± 6.6	16.6 ± 0.9	39.4 ± 0
Ataclè	<i>P</i> -value	0.04	<0.001	0.001	0.02		0.02	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<0.001	0.02
	P1	10.1 ± 0.0	34.5 ± 0.1	24.7 ± 0.1	2.0 ± 0.0	464 ± 0	24.4 ± 0.2	3.2 ± 0.1	67.9 ± 0.4	1.7 ± 0.0	509.2 ± 1.1	55.8 ± 3.0	148.5 ± 15
	P2	10.0 ± 0.0	28.6 ± 0.4	25.1 ± 0.2	2.3 ± 0.1	411 ± 2	37.8 ± 1.6	15.9 ± 6.2	73.9 ± 2.7	1.7 ± 0.1	516.3 ± 21.6	100 ± 8.6	197.5 ± 3
	P3	9.6 ± 0.2	36.8 ± 0.5	21.8 ± 0.3	2.4 ± 0.0	471 ± 3	38.1 ± 3.8	4.9 ± 0.4	63.4 ± 6.2	1.4 ± 0.2	473.4 ± 47.8	96.8 ± 5.2	178.8 ± 2
Ata	<i>P</i> -value	<0.001	<0.001	0.03	0.006		0.001	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<0.001	<i>ns</i>
	P1	7.0 ± 0.0	16.3 ± 0.3	18.1 ± 0.3	2.2 ± 0.0	257 ± 1	21.7 ± 0.8	4.6 ± 0.0	49.6 ± 1.4	1.1 ± 0.0	328.3 ± 9.8	80.9 ± 23	117.4 ± 28
	P2	8.0 ± 0.0	13.3 ± 0.3	20.7 ± 0.3	2.1 ± 0.1	244 ± 2	25.0 ± 1.5	4.0 ± 0.1	49.8 ± 2.7	1.2 ± 0.1	352.6 ± 20.9	79.0 ± 7.2	146.9 ± 3
	P3	7.4 ± 0.1	29.0 ± 1.2	17.2 ± 1.1	1.8 ± 0.0	368 ± 6	37.8 ± 0.2	4.0 ± 0.5	49.8 ± 0.2	1.2 ± 0.0	318.0 ± 3.8	50.8 ± 7.0	135.5 ± 2
Ata doco	<i>P</i> -value	<0.001	<0.001	<i>ns</i>	0.001		<i>ns</i>	0.05	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	0.001	0.01
	P1	7.6 ± 0.1	18.6 ± 0.4	21.1 ± 0.2	1.7 ± 0.1	294 ± 2	28.0 ± 1.1	3.7 ± 0.2	56.2 ± 2.0	1.4 ± 0.1	369.7 ± 16.1	52.4 ± 2.7	132.3 ± 10
	P2	9.1 ± 0.1	23.3 ± 0.2	21.5 ± 0.1	2.6 ± 0.0	345 ± 1	29.4 ± 0.8	3.0 ± 0.2	62.0 ± 2.4	1.6 ± 0.0	434.1 ± 16.1	86.3 ± 9.6	165.5 ± 3
	P3	9.7 ± 0.1	7.6 ± 0.8	23.2 ± 1.0	2.4 ± 0.1	213 ± 4	38.8 ± 5.1	5.5 ± 1.0	63.7 ± 8.0	1.4 ± 0.2	472.1 ± 64.7	53.4 ± 5.3	109.5 ± 9
Djongoli	<i>P</i> -value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001		0.002	<i>ns</i>	0.003	0.007	0.001	<0.001	0.005
	P1	3.2 ± 0.1	7.8 ± 0.2	16.5 ± 0.3	1.4 ± 0.0	160 ± 1	7.3 ± 0.5	1.3 ± 0.3	30.3 ± 0.9	0.7 ± 0.0	145.4 ± 3.4	14.9 ± 2.6	33.1 ± 1
	P2	5.8 ± 0.0	9.7 ± 0.2	21.8 ± 0.2	1.1 ± 0.0	208 ± 1	12.1 ± 0.4	1.8 ± 0.1	45.0 ± 1.9	1.0 ± 0.0	256.6 ± 12.1	50.4 ± 2	
	P3	3.7 ± 0.0	4.0 ± 0.0	17.7 ± 0.0	1.3 ± 0.0	132 ± 0	10.2 ± 0.2	1.6 ± 0.1	36.3 ± 0.7	0.7 ± 0.0	178.1 ± 4.5	32.5 ± 4.1	49.4 ± 3
Vêyi	<i>P</i> -value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001		0.004	0.01	0.04	0.02	0.02	0.01	0.001
	P1	7.0 ± 0.0	0.6 ± 0.0	14.4 ± 1.0	1.6 ± 0.0	105 ± 0	21.7 ± 0.7	1.6 ± 0.0	47.0 ± 1.8	1.0 ± 0.1	328.9 ± 19.3	73.9 ± 3.7	114.6 ± 4
	P2	7.9 ± 0.0	0.4 ± 0.0	18.8 ± 0.0	2.2 ± 8.7	125 ± 0	31.6 ± 1.6	1.4 ± 0.0	42.3 ± 1.3	1.1 ± 0.0	277.4 ± 6.0	88.8 ± 4.5	117.9 ± 8
	P3	7.5 ± 0.0	0.7 ± 0.0	16.9 ± 0.0	1.8 ± 0.0	119 ± 0	30.3 ± 0.5	1.4 ± 0.0	49.7 ± 1.4	1.2 ± 0.0	361.8 ± 9.9	78.8 ± 4.0	36.2 ± 2

P1 to P3 are the producers for each cowpea-based dish.

Table 6S: Nutritional density of cowpea-based dishes per 100 kcal

	Dish	Protein (g)	Fat (g)	Available carbohydrate (g)	Dietary fibre (g)	Ash (g)	Ca (mg)	Mg (mg)	K (mg)	Fe (mg)	Zn (mg)	Folate (µg)	Thiamin (µg)
<i>Stews</i>	<i>Abobo</i>	6.4 ± 0.3	0.5 ± 0.1	14.4 ± 0.8	6.0 ± 0.8	1.6 ± 0.6	31.3 ± 7.1	40.1 ± 5.5	276 ± 27	1.4 ± 0.4	1.0 ± 0.1	71.1 ± 15	44.3 ± 13
	<i>Vêyi</i>	6.4 ± 0.2	0.5 ± 0.1	14.3 ± 0.6	6.2 ± 0.5	1.6 ± 0.1	23.8 ± 2.5	40.1 ± 5.2	280 ± 46	1.3 ± 0.2	1.0 ± 0.1	69.1 ± 4	77.8 ± 37
	<i>Adowè</i>	6.6 ± 0.3	0.5 ± 0.2	14.6 ± 0.6	5.4 ± 0.3	1.6 ± 0.3	27.2 ± 5.8	39.5 ± 2.4	277 ± 32	1.1 ± 0.1	1.0 ± 0.1	69.2 ± 20	27.9 ± 20
<i>Doughnuts</i>	<i>Ata</i>	2.7 ± 0.6	6.6 ± 1.1	6.7 ± 1.7	1.7 ± 0.3	0.7 ± 0.2	9.7 ± 1.0	17.8 ± 3.4	120 ± 27	1.5 ± 0.3	0.4 ± 0.1	25.9 ± 10	47.6 ± 12
	<i>Ata doco</i>	3.3 ± 1.0	5.6 ± 1.6	8.1 ± 2.2	2.3 ± 0.5	0.8 ± 0.2	12.1 ± 4.9	22.3 ± 6.2	158 ± 52	1.6 ± 0.8	0.5 ± 0.1	22.6 ± 4	48.1 ± 4
	<i>Ataclè</i>	2.2 ± 0.2	7.4 ± 0.4	5.4 ± 0.7	1.6 ± 0.1	0.5 ± 0.1	7.5 ± 1.9	15.4 ± 2.2	112 ± 12	1.9 ± 1.7	0.4 ± 0.1	19.0 ± 6	39.3 ± 7
<i>Mixed</i>	<i>Atassi</i>	2.5 ± 0.2	0.6 ± 0.3	20.0 ± 0.7	2.3 ± 0.1	0.9 ± 0.1	7.0 ± 2.3	11.2 ± 2.9	75 ± 19	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.1	10.3 ± 2.5	28.8 ± 3
<i>cowpea-cereal dishes</i>	<i>Abla</i>	2.1 ± 0.5	6.0 ± 0.7	7.9 ± 1.2	3.0 ± 0.3	0.8 ± 0.2	14.7 ± 1.2	23.2 ± 1.6	97 ± 28	1.8 ± 1.1	0.4 ± 0.1	22.0 ± 11	29.3 ± 2
	<i>Djongoli</i>	2.5 ± 0.4	4.2 ± 0.9	11.4 ± 1.5	3.2 ± 0.6	0.8 ± 0.2	6.0 ± 1.4	22.7 ± 3.9	117 ± 21	0.9 ± 0.2	0.5 ± 0.1	26.8 ± 17	27.5 ± 8

Values are means ± standard deviation

Table 7S: Phytate and Alpha-galacto-oligosaccharide contents of the cowpea dishes (per 100 g of edible portion)

	Dish	Phytate (mg)	Raffinose (mg)	Stachyose (mg)	Verbascose (mg)
<i>Stews</i>	<i>Abobo</i>	146 ± 13	103 ± 23	963 ± 176	128 ± 30
	<i>Vêyi</i>	217 ± 64	117 ± 14	1253 ± 106	123 ± 52
	<i>Adowè</i>	197 ± 33	96 ± 7	816 ± 119	106 ± 15
<i>Doughnuts</i>	<i>Ata</i>	206 ± 14	105 ± 20	1090 ± 97	115 ± 5
	<i>Ata doco</i>	356 ± 106	130 ± 7	1288 ± 263	181 ± 49
	<i>Ataclè</i>	357 ± 72	150 ± 49	1390 ± 325	212 ± 29
<i>Mixed cowpea-cereal dishes</i>	<i>Atassi</i>	71 ± 23	64 ± 37	211 ± 58	36 ± 16
	<i>Abla</i>	166 ± 32	55 ± 22	380 ± 228	48 ± 13
	<i>Djongoli</i>	230 ± 46	68 ± 23	406 ± 196	77 ± 39

Table 8S: Percentage of daily nutritional contribution among the cowpea consumers * during the week before the FFQ survey

Area	Food groups	Protein (%)	Dietary fibre (%)	Ca (%)	Fe (%)	Mg (%)	Zn (%)	K (%)	Folate (%)	Thiamin (%)
<i>Rural</i>	<i>Ata</i>	1.0 [0.8 ; 1.3]	1.1 [0.9 ; 1.4]	0.2 [0.1 ; 0.3]	0.7 [0.5 ; 0.9]	1.5 [1.1 ; 1.9]	0.7 [0.5 ; 0.9]	0.7 [0.5 ; 0.9]	1.4 [1.0 ; 1.8]	0.8 [0.6 ; 0.9]
	<i>Ata doco</i>	1.7 [1.4 ; 2.0]	2.1 [1.7 ; 2.5]	0.3 [0.3 ; 0.4]	1.0 [0.9 ; 1.2]	2.6 [2.1 ; 3.1]	1.2 [1.0 ; 1.5]	1.2 [1.0 ; 1.5]	1.6 [1.3 ; 1.9]	1.2 [0.9 ; 1.4]
	<i>Ataclè</i>	0.3 [0.1 ; 0.4]	0.3 [0.1 ; 0.5]	0.05 [0.02 ; 0.07]	0.3 [0.1 ; 0.4]	0.4 [0.2 ; 0.6]	0.2 [0.1 ; 0.3]	0.2 [0.1 ; 0.3]	0.3 [0.1 ; 0.5]	0.2 [0.1 ; 0.3]
	<i>Atassi</i>	5.9 [5.4 ; 6.4]	9.6 [8.8 ; 10.5]	0.9 [0.8 ; 1.0]	0.9 [0.8 ; 1.0]	5.9 [5.4 ; 6.4]	3.1 [2.9 ; 3.4]	2.7 [2.5 ; 3.0]	3.3 [3.0 ; 3.6]	3.3 [3.0 ; 3.5]
	<i>Abla</i>	0.5 [0.3 ; 0.6]	1.2 [0.8 ; 1.6]	0.2 [0.1 ; 0.2]	0.5 [0.3 ; 0.7]	1.2 [0.8 ; 1.7]	0.4 [0.3 ; 0.6]	0.3 [0.2 ; 0.4]	0.7 [0.5 ; 0.9]	0.4 [0.2 ; 0.5]
	<i>Djongoli</i>	2.9 [2.3 ; 3.4]	6.5 [5.3 ; 7.7]	0.4 [0.3 ; 0.4]	0.3 [0.2 ; 0.4]	5.8 [4.7 ; 6.9]	2.5 [2.0 ; 2.9]	2.0 [1.7 ; 2.4]	4.2 [3.4 ; 4.9]	1.1 [0.9 ; 1.3]
	<i>Abobo</i>	10.9 [9.9 ; 11.9]	18.1 [16.4 ; 19.7]	2.9 [2.6 ; 3.1]	3.0 [2.7 ; 3.3]	15.4 [13.9 ; 16.8]	7.1 [6.4 ; 7.7]	7.2 [6.6 ; 7.9]	13.3 [12.1 ; 14.6]	3.5 [3.2 ; 3.8]
	<i>Vêyi</i>	1.2 [0.8 ; 1.6]	2.1 [1.4 ; 2.8]	0.2 [0.2 ; 0.3]	1.3 [1.1 ; 1.6]	1.7 [1.2 ; 2.3]	0.8 [0.6 ; 1.1]	0.8 [0.6 ; 1.1]	1.8 [1.2 ; 2.4]	0.9 [0.6 ; 1.2]
	<i>Adowè</i>	0.1 [0.1 ; 0.2]	0.2 [0.1 ; 0.3]	0.03 [0.01 ; 0.05]	0.03 [0.01 ; 0.05]	0.2 [0.1 ; 0.3]	0.1 [0.04 ; 0.1]	0.1 [0.04 ; 0.1]	0.2 [0.1 ; 0.3]	0.05 [0.02 ; 0.08]
<i>Urban</i>	<i>Ata</i>	5.1 [1.9 ; 3.9]	5.7 [4.8 ; 6.5]	3.5 [3.0 ; 4.1]	3.6 [3.1 ; 4.1]	7.6 [6.5 ; 8.7]	3.6 [3.1 ; 4.1]	3.5 [3.0 ; 4.0]	7.0 [6.0 ; 8.0]	4.2 [3.6 ; 4.8]
	<i>Ata doco</i>	2.9 [1.9 ; 3.9]	3.6 [2.4 ; 4.8]	0.6 [0.4 ; 0.8]	1.7 [1.1 ; 2.3]	4.5 [3.0 ; 6.0]	2.2 [1.4 ; 2.9]	2.1 [1.4 ; 2.9]	2.8 [1.8 ; 3.7]	2.1 [1.4 ; 2.7]
	<i>Ataclè</i>	0.9 [0.3 ; 1.4]	1.1 [0.4 ; 1.8]	0.2 [0.1 ; 0.2]	0.9 [0.3 ; 1.5]	1.3 [0.5 ; 2.2]	0.6 [0.2 ; 1.0]	0.7 [0.2 ; 1.1]	1.0 [0.4 ; 1.6]	0.7 [0.3 ; 1.7]
	<i>Atassi</i>	5.0 [4.5 ; 5.4]	8.1 [7.4 ; 8.9]	0.7 [0.7 ; 0.8]	0.8 [0.7 ; 0.8]	5.0 [4.6 ; 5.5]	2.7 [2.4 ; 2.9]	2.3 [2.1 ; 2.5]	2.7 [2.5 ; 3.0]	2.7 [2.4 ; 2.9]
	<i>Abla</i>	0.3 [0.1 ; 8.0]	0.7 [0.2 ; 1.2]	0.4 [0.1 ; 0.7]	0.3 [0.1 ; 0.5]	0.7 [0.2 ; 1.2]	0.3 [0.1 ; 0.4]	0.2 [0.1 ; 0.3]	0.4 [0.1 ; 0.7]	0.05 [0.01 ; 0.1]
	<i>Djongoli</i>	0.9 [0.7 ; 1.2]	2.1 [1.6 ; 2.7]	0.1 [0.1 ; 0.2]	0.4 [0.3 ; 0.6]	1.9 [1.4 ; 2.5]	0.8 [0.6 ; 1.0]	0.7 [0.5 ; 0.7]	1.4 [1.0 ; 1.8]	0.5 [0.3 ; 0.6]
	<i>Abobo</i>	9.9 [9.0 ; 10.9]	16.5 [14.9 ; 18.1]	2.6 [2.4 ; 2.9]	2.8 [2.5 ; 3.0]	14.0 [12.7 ; 15.4]	6.5 [5.8 ; 7.1]	6.6 [6.0 ; 7.2]	12.2 [11.0 ; 13.2]	3.2 [2.9 ; 3.5]
	<i>Vêyi</i>	2.7 [2.1 ; 3.3]	4.7 [3.7 ; 5.7]	0.5 [0.4 ; 0.7]	0.7 [0.5 ; 0.8]	3.8 [3.0 ; 4.7]	1.8 [1.4 ; 2.2]	1.8 [1.4 ; 2.2]	4.0 [3.1 ; 4.8]	1.5 [1.2 ; 1.9]
	<i>Adowè</i>	0.6 [0.5 ; 0.8]	0.9 [0.7 ; 1.1]	0.5 [0.4 ; 0.7]	0.1 [0.1 ; 0.2]	0.8 [0.6 ; 1.1]	0.4 [0.3 ; 0.5]	0.4 [0.3 ; 0.5]	0.9 [0.7 ; 1.1]	0.1 [0.1 ; 0.2]

Values are means (confidence intervals at 95%) *: All the respondents with exclusion of non-consumers of cowpea seeds.

Table 9S: Description of each nutritional class of cowpea-based dishes per area based on their percentage of contribution

<i>Nutritional class</i>		Urban (%)	Rural (%)
1	Iron	10.5	10.8
	Zinc	17.2	19.3
	Calcium	8.2	6.1
	Magnesium	36.5	41.6
	Potassium	16.7	20.7
	Thiamine	13.5	14.2
	Folate	29.5	32.2
	Protein	25.4	32.0
	Fibre	39.6	47.5
2	Iron	34.7	48.9
	Zinc	51.6	80.3
	Calcium	25.2	24.0
	Magnesium	110.3	174.1
	Potassium	50.1	76.4
	Thiamine	41.1	61.5
	Folate	87.8	140.6
	Protein	74.1	113.1
	Fibre	114.2	185.1

Values are generated by R software after performance of HAC.

Stews



Adowè



Abobo



Vêyi

Cowpea-based doughnuts



Ata



Ataciè



Ata-doco

Mixed cowpea-cereal dishes



Atassi



Djongoli



Abla

Figure 1S: Cowpea-based dishes consumed in Benin

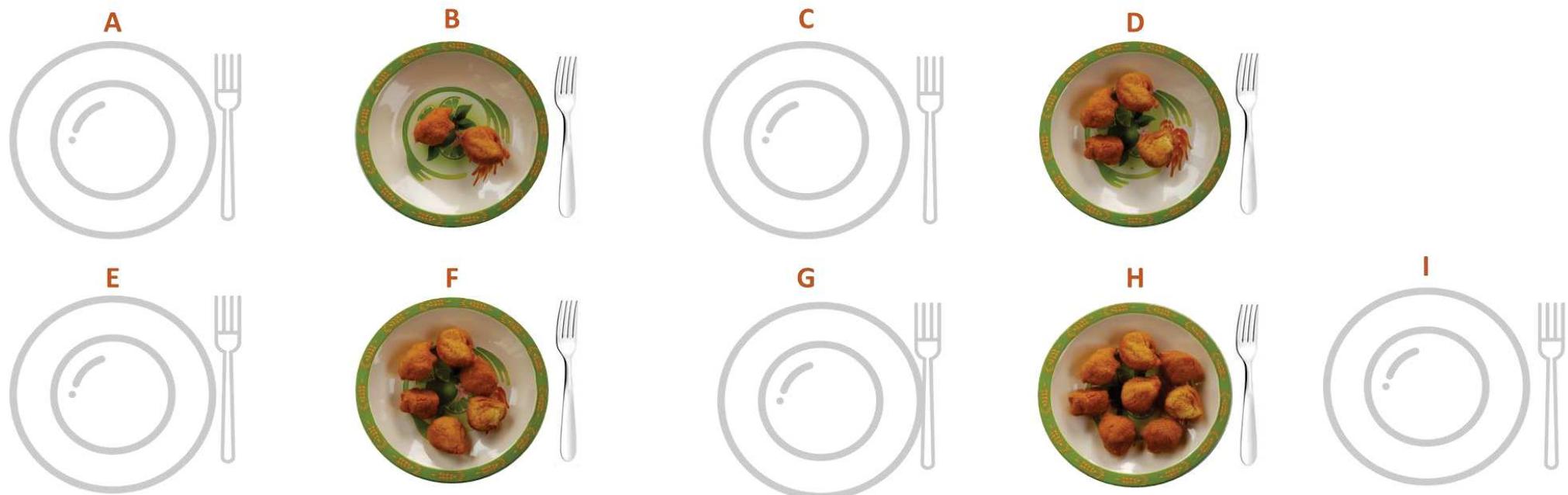


Figure 2S: Example of portion sizes for cowpea-based doughnuts Ata presented in the food atlas

Annexe 6: Supplementary material publication 3

Table 1S: Influence of processing variants on the micronutrient and anti-nutritional factor contents of ata doughnuts: results of the nested ANOVAs (fraction of the variance explained by each factor)

Factor	Dry matter	Proteins	Lipids	Ash	Iron	Zinc	Calcium	Magnesium	Folates	Raffinose	Stachyose	Verbascose	Phytates
Dehulling type	Percentage* (%)	-	-	13	-	-	13	-	-	-	-	-	-
	P-value	Ns	Ns	ns	ns	Ns	ns	Ns	ns	Ns	Ns	ns	ns
	WD												
	MD												
Producer	Percentage* (%)	95	97	85	88	99	23	97	66	91	100	95	95
	P-value	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	Ns	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	P1	60 ± 0	15 ± 1	44 ± 3	3 ± 0	11 ± 0	3 ± 0	47 ± 1.0	106 ± 0	119 ± 2	384 ± 6	2588 ± 122	413 ± 6
	P2	58 ± 0	12 ± 0	41 ± 0	1 ± 0	11 ± 0	2 ± 0	34 ± 0	73 ± 0	69 ± 10	263 ± 10	2350 ± 268	342 ± 58
	P3	55 ± 0	15 ± 0	43 ± 3	3 ± 0	5 ± 0	2 ± 0	52 ± 1	93 ± 2	140 ± 5	173 ± 6	1426 ± 170	218 ± 36
	P4	72 ± 4	10 ± 0	36 ± 1	3 ± 0	9 ± 0	2 ± 0	27 ± 1	70 ± 3	85 ± 7	445 ± 7	2879 ± 92	461 ± 10
	P5	61 ± 1	15 ± 0	62 ± 1	3 ± 0	4 ± 0	3 ± 0	34 ± 0	93 ± 1	111 ± 17	147 ± 11	1465 ± 17	190 ± 7
	P6	50 ± 1	17 ± 0	60 ± 0	30 ± 0	9 ± 0	3 ± 1	49 ± 4	114 ± 27	143 ± 12	236 ± 8	1949 ± 39	242 ± 5
Residual	Percentage* (%)	5	3	2	12	0	64.2	3	34	9	0	5	37

*: Percentage of variance associated with each factor, ns: not significant. Pn (with n varying from 1 to 6) represent the different producers of ata doughnuts.

Table 2S: Influence of processing parameters on the composition of Ata and Ata-doco doughnuts, determined using general linear models: estimated coefficients and p-values associated with each parameter

		Outcome variables																						
Factor / variable		Proteins (g/100g DM)		Lipids (g/100g DM)		Ash (g/100g DM)		Iron (mg/100g DM)		Calcium (mg/100g DM)		Magnesium (mg/100g DM)		Phytate (mg/100g DM)		Folate (µg/100g DM)		Raffinose (mg/100g DM)		Stachyose (mg/100g DM)		Verbacose (mg/100g DM)		
		β_k	p	β_k	p	β_k	p	β_k	p	β_k	P	β_k	p	β_k	p	β_k	p	β_k	p	β_k	p			
Ata																								
Constant		22	-	-	-	2.2	-	13	-	73		163	-	678	-	213	-	448		2451	-	380	-	
Dehulling type	Wet dehulling	1.1		-	-	-	-	-	-	6.5		-	-	-	-	8.8		24		-	-	-	-	
	Dry dehulling	-1.1		-	-	-	-	-	-	-6.5		(0.0003)	-	-	-	-	-8.8		(0.0335)	(0.0451)	-	-	-	-
Number of grits washing		-	-	-	-	-	-	-0.6	(0.002)	-1.3	(0.0058)	-4.4	(0.0075)	-2.7	(0.0175)	-4.1	(0.0053)	-46	(< 0.0001)	-125	(0.001)	-25	(0.0001)	
Soaking duration (min)		-0.2	(< 0.0001)	-	-	-0.04	(0.0185)	-	-	-0.1	(< 0.0001)	-1.7	(0.0004)	-4.3	(< 0.0001)	-3.2	(< 0.0001)	-10	(0.0001)	-	-	-	-	
Water/cowpea seeds ratio		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	74	(0.0004)	-	-	-	-	
Number of milling cycles		-	-	-	-	-0.8	(0.0246)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Whipping duration (min)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	(< 0.0001)	25	(0.002)	5.1	(0.0001)	
Frying duration (min)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Initial frying temperature (T0 °C)		-0.02	(0.001)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Final temperature (TF °C)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Coefficient of determination of the model (R²)		0.94	-	0.53	0.53	0.86	-	0.55	0.85	0.99		0.78		0.89										
Ata-doco																								
Constant		20	-	4.9	-	1.8	-	1.5	-	84	-	-	-	-	-	164	-	-	-	-	-	-	-	
Milling type	Direct milling	0.6		-	-	-	-	-9.9		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Cushing before milling	-0.6		-	-	-	-	9.9		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Number of milling cycles		-	-	-	-	0.7	(0.003)	3.3	(0.0095)	-3.5	(0.0003)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Whipping duration (min)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
NaHCO₃ quantity added to the dough		-	-	-	-	-0.6	(0.0141)	-	-	-4.3	(< 0.0001)	-	-	-	-	25	(0.0001)	-	-	-	-	-	-	
Frying duration (min)		-	-	1.0	(0.01)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Initial frying temperature (T0 °C)		-0.02	(0.0347)	0.1	(0.0007)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Final temperature (TF °C)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Coefficient of determination of the model (R²)		0.6	0.66	0.68	0.84	0.64	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	

For dry matter content and zinc content, none of the factors exhibited significant effects; therefore, no general linear model could be used. -: non significant factor

Table 3S: Influence of the processing variants on the micronutrient and anti-nutritional factor contents of ata-doco doughnuts: results of the nested ANOVAs (fraction of the variance explained by each factor)

Factor	Dry matter	Proteins	Lipids	Ash	Iron	Zinc	Calcium	Magnesium	Folate	Raffinose	Stachyose	Verbacose	Phytate
Milling type	Percentage* (%)	21	27	-	-	84	-	-	-	-	-	-	-
	P-value	Ns	<0.05	ns	Ns	<0.05	ns	Ns	ns	Ns	Ns	ns	ns
	DM		17 ± 1			5 ± 1							
	CBM		16 ± 1			28 ± 10							
NaHCO ₃	Percentage* (%)	-	-	30	44	-	16	52	56	4.0	29	34	26
	P-value	Ns	ns	<0.05	<0.05	ns	ns	<0.05	<0.05	ns	<0.05	<0.05	ns
	With NaHCO ₃		32 ± 2	3 ± 0			58 ± 1	113 ± 3		232 ± 28	1962 ± 212	233 ± 18	
	Without NaHCO ₃		26 ± 4	6 ± 1			68 ± 6	124 ± 7		263 ± 23	2240 ± 159	262 ± 18	
Producer	Percentage* (%)	21	55	60	37	-	50	28	34	87	60	36	28
	P-value	Ns	<0.05	<0.05	<0.05	ns	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	ns	<0.05
	P7		16 ± 0	31 ± 0	4 ± 0		3 ± 0	58 ± 0	115 ± 1	246 ± 12	255 ± 13	2144 ± 25	596 ± 19
	P8		18 ± 0	34 ± 3	3 ± 0		3 ± 0	59 ± 2	112 ± 4	168 ± 23	209 ± 7	1780 ± 42	607 ± 12
	P10		19 ± 0	30 ± 0	7 ± 1		3 ± 0	68 ± 3	124 ± 2	182 ± 8	245 ± 2	2108 ± 57	644 ± 20
	P11		17 ± 0	28 ± 0	5 ± 0		3 ± 0	63 ± 1	121 ± 0	134 ± 22	268 ± 23	2215 ± 215	573.4 ± 38
	P12		18 ± 1	19 ± 0	4 ± 0		3 ± 0	77 ± 2	137 ± 3	211 ± 7	299 ± 5	2379 ± 108	739 ± 44
	P13		16 ± 1	27 ± 2	6 ± 1		3 ± 0	66 ± 6	121 ± 5	157 ± 10	256 ± 19	2245 ± 168	686.5 ± 45
Residual	Percentage (%)	58.6	18	10	19	15	34	20	10	9	20	30	46
													25

*: Percentage of variance associated with each factor, ns: not significant. Pn (with n varying from 7 to 13) represent the different producers ata-doco doughnuts.

Table 4S: Proximate composition of ata and ata-doco (Fresh weight)

	Moisture	Available carbohydrate*	Proteins	Fat	Ash	Dietary Fibres			
	g/100 g		(g/100 g FW)			(g/100 g FW)	IDF	SDF	TDF
Cowpea seed	11 ± 0	52 ± 1	20 ± 1	1.4 ± 0	3.0 ± 0	11 ± 1	2.3 ± 0	13 ± 1	
Ata	WD(n=3)	42 ± 1	18 ± 2	8.1 ± 1	25 ± 1	1.5 ± 0	4.9 ± 0	0.7 ± 0	5.6 ± 0
	DD (n=3)	39 ± 10	15 ± 13	8.4 ± 1	31 ± 5	1.8 ± 0	3.2 ± 0	0.8 ± 0	4.0 ± 0
Ata-doco	DM 1 (n=2)	46 ± 4	20 ± 3	9.3 ± 0	18 ± 1	1.9 ± 0	4.7 ± 1	1.2 ± 0	5.9 ± 1
	DM 2(n=3)	47 ± 3	21 ± 5	9.4 ± 1	13 ± 2	2.8 ± 1	4.7 ± 0	1.2 ± 0	5.9 ± 0
	CBM (n=1)	42 ± 4	24 ± 2	9.1 ± 1	16 ± 2	3.4 ± 0	4.8 ± 0	1.0 ± 0	5.8 ± 1
Ata vs. Ata-doco	P-value	Ns	0.02	0.0023	<0.0001	0.0005	ns	0.0033	0.0096
	Ata	41 ± 7	17 ± 9	8.2 ± 1	28 ± 5	2.6 ± 0	4.1 ± 1	0.8 ± 0	4.9 ± 1
	Ata-doco	45 ± 4	22 ± 4	9.3 ± 1	15 ± 3	2.8 ± 3	4.7 ± 0	1.2 ± 0	5.9 ± 1

WD: Wet dehulling, DD: Dry dehulling, DM 1: Direct milling with NaHCO₃, DM2: Direct milling without NaHCO₃, CBM: Crushing before milling, ns: not significant, *: Values were obtained by difference ((100 g - (protein + lipid + ash+ dietary fibres))).

Table 5S: Mean mineral, folate, phytate, and alpha-galactoside contents of ata and ata-doco (average of the different processing variants)

	Iron (mg)	Zinc (mg)	Calcium (mg)	Magnesium (mg)	Folate (µg)	Phytate (mg)	Raffinose (mg)	Stachyose (mg)	Verbascose (mg)	Total α-gal (mg)
/100g DM										
P-value	ns	0.0001	<0.00001	<0.00001	<0.00001	<0.00001	ns	ns	ns	ns
Ata (n=6)	7.9 ± 3	2.5 ± 1	42 ± 9	88 ± 13	111 ± 29	525 ± 100	275 ± 112	2110 ± 580	311 ± 108	2695 ± 792
Ata-doco (n=8)	14 ± 13	2.9 ± 0	65 ± 7	121 ± 8	177 ± 36	656 ± 63	255 ± 27	2170 ± 207	254 ± 24	2680 ± 254
/100g FW										
P-value	ns	0.0399	<0.00001	<0.00001	<0.00001	<0.00001	ns	ns	0.0346	ns
Ata (n=6)	4.7 ± 2	1.5 ± 0	24 ± 4	52 ± 7	65 ± 14	308 ± 48	167 ± 86	1271 ± 465	189 ± 84	1627 ± 631
Ata-doco (n=8)	7.4 ± 6	1.6 ± 0	36 ± 4	67 ± 6	97 ± 22	364 ± 52	141 ± 20	1197 ± 173	140 ± 21	1479 ± 213

DM : Dry matter, FW: Fresh weight, n: number of sampled ata or ata-doco doughnuts, ns: not significant.

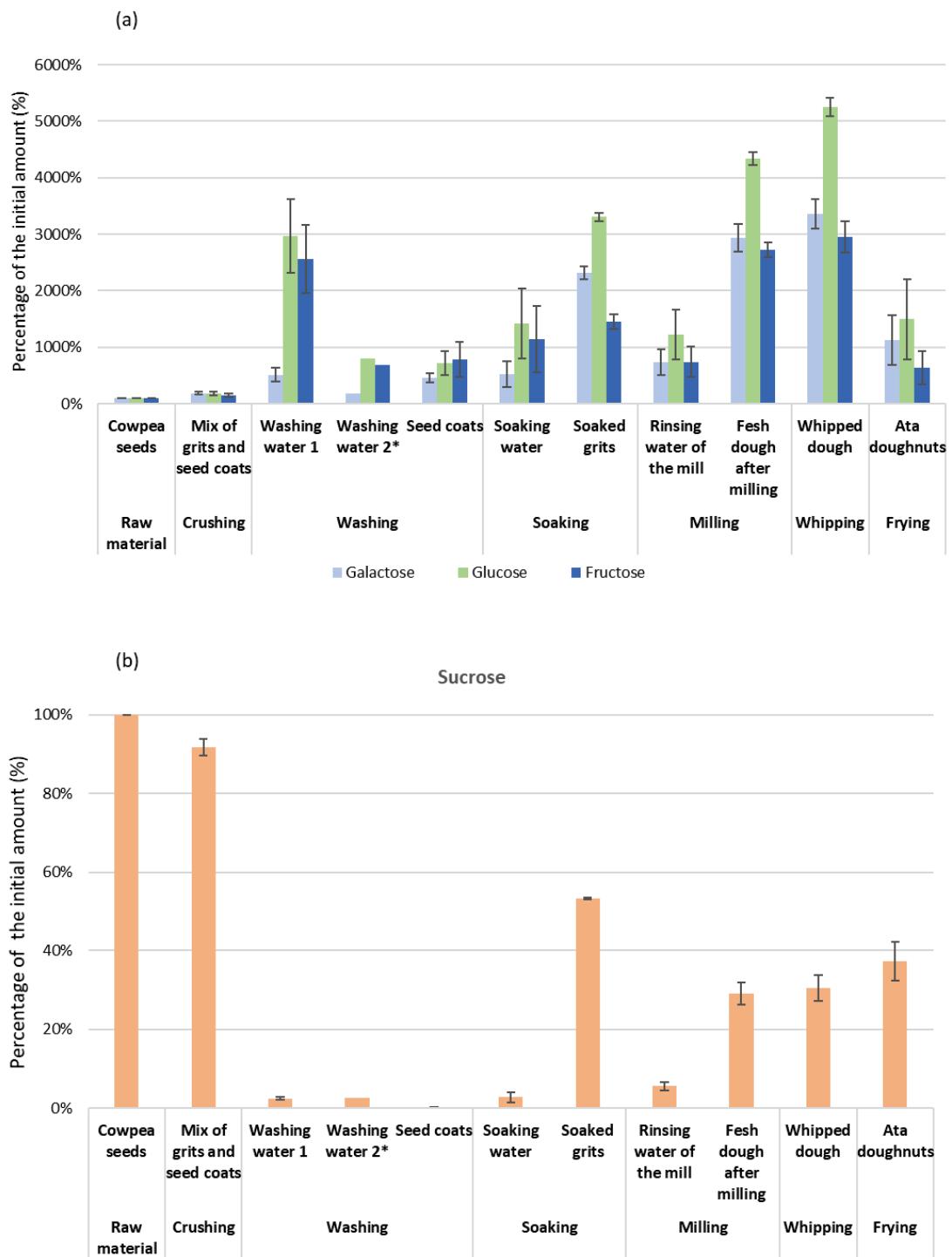


Figure 3S: Galactose, glucose, fructose (a), and sucrose (b) distribution in the different production fractions during the traditional processing of Ata