

Formulation, caractérisation nutritionnelle et sécurité toxicologique d'un aliment thérapeutique prêt à l'emploi à base d'arachide, de sésame, de graine d'amarante et d'épinard

Formulation, nutritional characterization and toxicological safety of a ready-to-use therapeutic food based on peanut, sesame, amaranth seeds and spinach

Daniel NGELESE MAKUWA^{1,*}, Lamy LUHUNU TAMUNDELE¹, Maximillien YUMBA KASONGO¹, Joël NDENDJE BATIANGO², Arthur DUKI MPANZU³, Alphonse BUSHABU METETE⁴, Paola MWANAMOKI MBOKOSO¹, Pierre-Célestin MUTINSUMU MUFENG¹

¹Section Sciences des Aliments, Nutrition-Diététique, Institut Supérieur des Techniques Médicales de Kinshasa, RD Congo ;

²Centre Régional d'Etudes Nucléaires de Kinshasa, Kinshasa, RD Congo ;

³Faculté des Sciences Pharmaceutiques, Université de Kinshasa, Kinshasa, RD Congo ;

⁴Section Biologie Médicale, Institut Supérieur des Techniques Médicales de Kananga, RD Congo.

RESUME :

La malnutrition aiguë sévère demeure un problème majeur de santé publique en République démocratique du Congo. Le recours aux aliments thérapeutiques prêts à l'emploi (ATPE) importés soulève des préoccupations liées à l'accessibilité, au coût et à la disponibilité. La valorisation des ressources alimentaires locales constitue une piste prometteuse pour développer des alternatives adaptées au contexte congolais. Formuler et caractériser un ATPE à base d'arachide, de sésame, de graines d'amarante et d'épinard, et évaluer sa qualité nutritionnelle et sa sécurité toxicologique. Une étude expérimentale comparative a été conduite au laboratoire de Biochimie et Technologie des Aliments du CREN-K. Cinq formulations (F1-F5), préparées en trois lots indépendants, ont été évaluées. La composition centésimale, la valeur énergétique, les acides aminés essentiels et les principaux minéraux ont été déterminés. Les phytates, oxalates, tanins, cyanure d'hydrogène (HCN) et aflatoxines ont également été analysés. La stabilité des aflatoxines a été évaluée après six mois de conservation. L'acceptabilité sensorielle et l'indice prédictif d'efficacité nutritionnelle (IPEN) ont été étudiés comme paramètres complémentaires. La densité énergétique variait de 524 à 548 kcal/100 g, les protéines de 13,6 à 15,8 g/100 g et les lipides de 28,2 à 34,6 g/100 g. F4 présentait les meilleures performances nutritionnelles, avec 548 kcal/100 g, 15,8 g de protéines et un IPEN de 1,000. F5 obtenait la meilleure acceptabilité sensorielle (24,65/30 ; $p < 0,001$). Les facteurs antinutritionnels étaient faibles et les aflatoxines demeuraient inférieures à 3 µg/kg après six mois. Ces résultats démontrent la faisabilité de développer un ATPE local présentant un profil nutritionnel et toxicologique favorable. Des études de biodisponibilité, de stabilité prolongée et surtout des essais cliniques sont nécessaires avant toute utilisation thérapeutique.

Mots clés : ATPE ; sésame ; amarante ; malnutrition aiguë sévère ; nutrition ; aflatoxines ; sécurité toxicologique.

ABSTRACT :

Severe acute malnutrition remains a major public health concern in the Democratic Republic of the Congo. Dependence on imported ready-to-use therapeutic foods (RUTFs) raises concerns regarding accessibility, cost and availability. Valorization of locally available food resources may provide an appropriate alternative for the development of context-specific therapeutic foods. Objective: To formulate and characterize a RUTF based on peanut, sesame, amaranth seeds and spinach, and to assess its nutritional quality and toxicological safety. A comparative experimental study was conducted at the Food Biochemistry and Technology Laboratory of CREN-K. Five formulations (F1-F5), prepared in three independent batches, were evaluated. Proximate composition, energy value, essential amino acids and major minerals were determined. Phytates, oxalates, tannins, hydrogen cyanide (HCN) and aflatoxins were also assessed. Aflatoxin stability was evaluated after six months of storage. Sensory acceptability and the Predictive Index of Nutritional Effectiveness (PINE) were assessed as complementary parameters. Energy density ranged from 524 to 548 kcal/100 g, protein content from 13.6 to 15.8 g/100 g and fat content from 28.2 to 34.6 g/100 g. F4 showed the best nutritional performance, with 548 kcal/100 g, 15.8 g protein and a PINE of 1.000. F5 showed the highest sensory acceptability score (24.65/30; $p < 0.001$). Antinutritional factors were low, while aflatoxin levels remained below 3 µg/kg after six months of storage. These findings demonstrate the feasibility of developing a locally produced RUTF with favorable nutritional and toxicological characteristics. Further studies on nutrient bioavailability, long-term stability and, particularly, clinical efficacy are required before therapeutic implementation.

Keywords: RUTF; sesame; amaranth; severe acute malnutrition; nutrition; aflatoxins; toxicological safety; Democratic Republic of the Congo.

*Adresse des Auteur(s)

Daniel NGELESE MAKUWA, Section Sciences des Aliments, Nutrition-Diététique, Institut Supérieur des Techniques Médicales de Kinshasa, RD Congo ;

E-mail : danielmakuwa24@gmail.com ;

Tél : +243 814291672 ;

Lamy LUHUNU TAMUNDELE, Section Sciences des Aliments, Nutrition-Diététique, Institut Supérieur des Techniques Médicales de Kinshasa, RD Congo ;

Maximillien YUMBA KASONGO, Section Sciences des Aliments, Nutrition-Diététique, Institut Supérieur des Techniques Médicales de Kinshasa, RD Congo ;

Joël NDENDJE BATIANGO, Centre Régional d'Etudes Nucléaires de Kinshasa, Kinshasa, RD Congo ;

Arthur DUKI MPANZU, Faculté des Sciences Pharmaceutiques, Université de Kinshasa, Kinshasa, RD Congo ;

Alphonse BUSHABU METETE, Section Biologie Médicale, Institut Supérieur des Techniques Médicales de Kananga, RD Congo ;

Paola MWANAMOKI MBOKOSO, Section Sciences des Aliments, Nutrition-Diététique, Institut Supérieur des Techniques Médicales de Kinshasa, RD Congo ;

Pierre-Célestin MUTINSUMU MUFENG, Section Sciences des Aliments, Nutrition-Diététique, Institut Supérieur des Techniques Médicales de Kinshasa, RD Congo ;

I. INTRODUCTION

La malnutrition aiguë sévère (MAS) constitue l'une des formes les plus graves de dénutrition chez l'enfant et demeure un problème majeur de santé publique dans les pays à ressources limitées. Elle se caractérise notamment par une émaciation sévère et/ou la présence d'un œdème nutritionnel et expose les enfants à un risque accru de complications infectieuses, de retard de croissance et de décès. L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) estime que près de 19 millions d'enfants de moins de cinq ans sont concernés par la malnutrition aiguë sévère dans le monde [1]. La prise en charge nutritionnelle rapide et appropriée constitue ainsi

un élément essentiel de la réduction de la morbidité et de la mortalité associées à cette affection.

Au cours des dernières décennies, les aliments thérapeutiques prêts à l'emploi (ATPE) ont considérablement amélioré la prise en charge nutritionnelle des enfants atteints de MAS sans complication médicale. Leur forte densité énergétique, leur faible teneur en eau, leur facilité de conservation et leur possibilité d'être administrés sans préparation complexe permettent notamment leur utilisation dans les programmes de prise en charge ambulatoire [1,2]. Les recommandations actuelles de l'OMS préconisent, chez les enfants de 6 à 59 mois pris en charge en ambulatoire pour émaciation sévère et/ou œdème nutritionnel, une quantité d'ATPE permettant initialement un apport de 150 à 185 kcal/kg/jour jusqu'à la récupération anthropométrique [1].

Cependant, l'accès durable aux ATPE demeure une préoccupation dans de nombreux pays à revenu faible ou intermédiaire. Le coût de production, les contraintes d'approvisionnement et la dépendance à certaines matières premières importées peuvent limiter leur disponibilité. Cette problématique est particulièrement pertinente en République démocratique du Congo (RDC), où des préparations alimentaires locales sont parfois utilisées dans les unités de nutrition thérapeutique, alors que leur composition nutritionnelle et leur conformité aux standards internationaux ne sont pas toujours suffisamment documentées. Une étude récente conduite dans plusieurs provinces de la RDC a notamment montré que certaines préparations locales pouvaient présenter des déficits en vitamines et en minéraux essentiels tels que le calcium, le fer, l'iode, le sélénium et le zinc [3]. Cette situation souligne la nécessité de développer des formulations locales scientifiquement caractérisées, plutôt que de simplement substituer des produits importés par des mélanges alimentaires empiriques.

Dans cette perspective, la valorisation des ressources alimentaires disponibles localement apparaît comme une stratégie intéressante. L'utilisation d'ingrédients tels que l'arachide, le sésame, les graines d'amarante et l'épinard peut contribuer à fournir des protéines, des lipides, des glucides, des fibres et différents micronutriments. L'arachide et le sésame présentent notamment un intérêt pour leur densité énergétique et leur richesse en matières grasses, tandis que les graines d'amarante constituent une source végétale de protéines et de minéraux. L'épinard peut, quant à lui, contribuer à l'apport en micronutriments. Toutefois, la valeur nutritionnelle théorique des matières premières ne suffit pas à garantir la qualité d'un produit thérapeutique : les proportions des ingrédients, les procédés de transformation, la biodisponibilité des nutriments et la sécurité sanitaire doivent être rigoureusement maîtrisés.

L'intérêt d'utiliser des sources protéiques non exclusivement laitières est aujourd'hui également reconnu dans l'évolution des formulations d'ATPE. L'OMS a réexaminé la nécessité d'une proportion obligatoire élevée de protéines laitières dans les ATPE, notamment parce que des formulations utilisant des sources protéiques alternatives ont été étudiées dans différents contextes et pourraient contribuer à réduire les coûts et à accroître l'accès au traitement [4]. Cette évolution ouvre un espace important pour la recherche sur des formulations adaptées aux disponibilités alimentaires, aux habitudes de consommation et aux réalités économiques locales.

La caractérisation nutritionnelle constitue donc une étape fondamentale dans le développement d'un ATPE local. Un produit destiné à la récupération nutritionnelle doit fournir une quantité importante d'énergie dans un faible volume et présenter une composition appropriée en protéines, lipides, glucides, vitamines et minéraux. Les micronutriments revêtent une importance particulière chez les enfants sévèrement malnutris, chez lesquels les déficiences nutritionnelles sont fréquentes et doivent être corrigées pour permettre une récupération complète [5].

Parallèlement à la valeur nutritionnelle, la sécurité toxicologique doit être considérée comme une exigence fondamentale. Les matières premières végétales, notamment les arachides et les céréales ou pseudo-céréales, peuvent être exposées à différents contaminants. Les aflatoxines constituent une préoccupation particulière en raison de leur toxicité et de leur association avec des effets sanitaires graves. Le Codex Alimentarius dispose désormais de lignes directrices spécifiques relatives aux ATPE et de critères concernant les contaminants susceptibles d'affecter leur sécurité [6,7].

La transformation technologique des matières premières doit également permettre de limiter les facteurs antinutritionnels, tels que les phytates, les oxalates et certains tanins, susceptibles d'interférer avec la biodisponibilité de plusieurs nutriments. Ainsi, l'évaluation d'un ATPE local ne peut se limiter à la détermination des macronutriments : elle doit intégrer une approche globale associant composition nutritionnelle, profil minéral, facteurs antinutritionnels et contaminants chimiques.

Dans le contexte congolais, cette problématique revêt une importance particulière. La disponibilité de matières premières locales ne garantit pas automatiquement la qualité d'un produit thérapeutique. Une formulation destinée à des enfants souffrant de MAS doit être standardisée, reproductible et soumise à des contrôles analytiques permettant de vérifier sa conformité nutritionnelle et sanitaire. Le développement d'un tel produit représente donc

à la fois un défi scientifique et une opportunité de valorisation des ressources alimentaires nationales.

C'est dans cette perspective que s'inscrit la présente étude, consacrée à la formulation, à la caractérisation nutritionnelle et à l'évaluation de la sécurité toxicologique d'un aliment thérapeutique prêt à l'emploi à base d'arachide, de sésame, de graines d'amarante et d'épinard. Cinq formulations expérimentales ont été développées afin d'examiner l'influence des proportions des différentes matières premières sur la composition nutritionnelle et la sécurité du produit. L'étude a également intégré, comme paramètres complémentaires, l'évaluation de l'acceptabilité sensorielle et de l'efficacité nutritionnelle prédictive.

L'objectif était donc de formuler un ATPE à partir de ressources alimentaires locales, d'en caractériser la composition nutritionnelle et d'évaluer sa sécurité toxicologique, afin d'identifier les formulations présentant les caractéristiques les plus favorables pour des investigations ultérieures. Il ne s'agissait pas, à ce stade, de démontrer une efficacité thérapeutique clinique, mais de fournir une preuve de faisabilité analytique et nutritionnelle pouvant servir de base à de futures études de biodisponibilité, de stabilité et d'efficacité clinique.

II. MATERIEL ET METHODES

II.1. Type et design de l'étude

Il s'agissait d'une étude expérimentale, analytique et comparative, réalisée en laboratoire, comportant une composante longitudinale destinée à apprécier la stabilité des aflatoxines au cours du stockage. Le protocole comprenait quatre étapes successives : formulation des prototypes, caractérisation physicochimique et nutritionnelle, évaluation de la sécurité toxicologique et évaluation sensorielle, suivies d'un contrôle des aflatoxines après six mois de conservation. Aucune intervention clinique n'a été réalisée chez l'être humain.

Cinq formulations expérimentales, désignées F1 à F5, ont été comparées entre elles. Les variables indépendantes correspondaient aux différentes proportions d'arachide, de sésame, d'amarante, d'épinard et des autres ingrédients, tandis que les variables dépendantes comprenaient la composition nutritionnelle, la composition minérale, la sécurité toxicologique et, à titre complémentaire, l'acceptabilité sensorielle.

II.2. Cadre de l'étude

Les travaux ont été réalisés au Laboratoire de Biochimie et Technologie des Aliments du Centre Régional d'Études Nucléaires de Kinshasa (CREN-K), situé sur le site de

l'Université de Kinshasa, dans la commune de Lemba. Le laboratoire dispose notamment d'un spectromètre ED-XRF Xepos III, d'un chromatographe HPLC, d'un four à moufle, d'une étuve, d'une balance analytique, d'un extracteur Soxhlet et d'un dispositif Kjeldahl.

Les analyses minérales ont été réalisées par fluorescence X à dispersion d'énergie (ED-XRF) et les aflatoxines par chromatographie liquide haute performance (HPLC) avec détection par fluorescence. L'étude a reçu un avis favorable du comité d'éthique de l'ISTM-Kinshasa (ISTM/CE/005/2022) et l'accès au CREN-K a été autorisé par le Commissariat Général à l'Énergie Atomique (CGEA/DRT/2022/12).

II.3. Matériel et matières premières

Les matières premières utilisées étaient constituées de :

- graines d'arachide (*Arachis hypogaea*) ;
- graines de sésame (*Sesamum indicum*) ;
- graines d'amarante (*Amaranthus spp.*) ;
- feuilles d'épinard (*Spinacia oleracea*) ;
- huile de palme ;
- huile de poisson ;
- sucre brun ;
- lait entier en poudre.

Les ingrédients ont été acquis sur les marchés locaux de Kinshasa, notamment au marché Wenzé ya Ngaba pour les végétaux secs et au port de Kinkole pour l'huile de poisson, afin de reproduire autant que possible les conditions réelles d'approvisionnement local.

II.4. Formulation des ATPE

Cinq formulations ont été élaborées. La formulation F1 était dominée par l'arachide, tandis que les autres formulations modifiaient progressivement les proportions de sésame et d'amarante.

La formulation F1 comprenait 50 % d'arachide, 10 % de sésame, 10 % d'amarante, 5 % d'épinard, 10 % d'huile de palme, 10 % de sucre brun et 5 % de lait entier en poudre.

F2 incorporait 40 % d'arachide, 15 % de sésame, 15 % d'amarante, 5 % d'épinard, 10 % d'huile de palme, 10 % de sucre brun et 5 % de lait en poudre.

F3 comportait 35 % d'arachide, 10 % de sésame et 25 % d'amarante, avec les autres ingrédients maintenus selon le protocole.

F4 associait 30 % d'arachide et 30 % de sésame, avec 10 % d'amarante et 5 % d'épinard, auxquels étaient ajoutés l'huile de palme, le sucre brun et le lait en poudre.

F5 contenait 30 % d'arachide et 10 % de sésame, avec 20 % d'amarante et 5 % d'épinard, auxquels étaient ajoutés l'huile de palme, le sucre brun et le lait en poudre.

Prétraitement des matières premières

Les arachides et le sésame ont été triés puis torréfiés à 140 °C pendant 15 minutes, avant refroidissement et broyage à travers un tamis de 0,5 mm. Les graines d'amarante ont été légèrement torréfiées à 110 °C pendant 10 minutes puis broyées. Les feuilles d'épinard ont été lavées, blanchies pendant deux minutes, séchées à 50 °C pendant 24 heures, puis réduites en poudre.

Les différentes poudres ont ensuite été pesées selon les proportions prévues et mélangées mécaniquement pendant 10 minutes. Les huiles ont été préchauffées à 40 °C, incorporées progressivement au mélange et le pétrissage poursuivi pendant environ 15 minutes jusqu'à obtention d'une pâte homogène. Le produit final a été conditionné dans des sachets d'aluminium multicouches de 50 g, puis conservé à l'abri de la lumière et de la chaleur.

II.5. Réplication expérimentale

Cinq formulations ont été préparées, chacune en trois lots indépendants, réalisés à des jours différents à partir de matières premières issues des mêmes lots. Chaque analyse physicochimique a été réalisée en triple sur chaque lot, correspondant à neuf mesures analytiques par formulation.

Les conditions de production ont été standardisées : température de torréfaction, granulométrie, durée du mélange et conditions de stockage. Les appareils ont fait l'objet de contrôles et d'étalonnages appropriés.

II.6. Caractérisation nutritionnelle

La composition nutritionnelle a porté sur l'humidité, les cendres, les protéines brutes, les lipides totaux, les fibres, les glucides assimilables et la valeur énergétique.

L'humidité a été déterminée par séchage à 105 °C jusqu'à masse constante, tandis que les cendres totales ont été obtenues par incinération à 550 °C.

Les lipides ont été déterminés par extraction continue au Soxhlet à l'éther de pétrole, tandis que les protéines ont été dosées selon la méthode de Kjeldahl, avec un facteur de conversion de l'azote en protéines de 6,25.

Les glucides assimilables ont été calculés par différence : $\text{Glucides (\%)} = 100 - (\text{humidité} + \text{cendres} + \text{protéines} + \text{lipides} + \text{fibres})$.

La valeur énergétique a été calculée selon les coefficients d'Atwater, soit 4 kcal/g pour les protéines, 4 kcal/g pour les glucides et 9 kcal/g pour les lipides.

II.7. Détermination des éléments minéraux

Les concentrations en calcium (Ca), potassium (K), fer (Fe), phosphore (P) et zinc (Zn) ont été déterminées par spectrométrie de fluorescence X à dispersion d'énergie (ED-XRF).

Une prise d'essai de 3 g de pâte a été utilisée. Les mesures ont été effectuées à l'aide du spectromètre Xepos III selon les méthodes FP-Powder et Turbo-Quant Powder Fast, avec utilisation des étalons IPE 135, IPE 133 et IPE 197 pour l'étalonnage externe. Les résultats ont été exprimés en mg/100 g.

II.8. Evaluation de la sécurité toxicologique

La sécurité toxicologique a été évaluée à travers la détermination des facteurs antinutritionnels et des aflatoxines. Les paramètres étudiés comprenaient notamment les phytates, oxalates, tanins et cyanure d'hydrogène (HCN), ainsi que les aflatoxines totales.

Les aflatoxines B1, B2, G1 et G2 ont été extraites à partir des échantillons, purifiées sur colonne d'immunoaffinité, puis séparées et quantifiées par HPLC avec détection par fluorescence. La méthode utilisait une dérivation post-colonne pour améliorer la détection de B1 et G1.

La quantification reposait sur un étalonnage externe à cinq niveaux de concentration. La limite de quantification rapportée était de 0,5 µg/kg pour chaque aflatoxine. Les résultats étaient exprimés en µg/kg pour la somme B1+B2+G1+G2.

II.9. Evaluation de la stabilité des aflatoxines

Les formulations conditionnées dans des sachets hermétiques ont été conservées pendant six mois à température ambiante (25 ± 2 °C). Les aflatoxines ont été dosées immédiatement après la production (T0), puis après six mois de stockage (T6).

Cette approche a permis d'apprécier l'évolution de la contamination par les aflatoxines au cours de la période de conservation étudiée.

II.10. Evaluation sensorielle

L'évaluation sensorielle a été réalisée auprès de 80 étudiants volontaires de l'ISTM-Kinshasa, âgés de 18 à 32 ans. Les critères d'inclusion comprenaient l'absence d'allergie connue à l'arachide ou au sésame, l'absence de trouble de l'odorat ou du goût et la signature d'un consentement éclairé.

Chaque participant a évalué les cinq formulations selon quatre attributs : couleur (1–5), odeur (1–10), saveur (1–10) et consistance (1–5), soit un score maximal de 30 points. Les échantillons étaient codés et présentés dans un ordre randomisé selon un plan en blocs complets randomisés.

II.11. Contrôle des biais et assurance qualité

Afin de limiter les biais, l'ordre de présentation des échantillons lors de l'évaluation sensorielle a été randomisé et les formulations étaient présentées sous des codes numériques ne permettant pas aux dégustateurs d'identifier leur composition. Les analyses ont été réalisées dans le même laboratoire et avec les mêmes équipements calibrés. Des standards certifiés ont été utilisés pour l'ED-XRF et la HPLC, tandis que des blancs analytiques ont été introduits dans les séries de dosage.

combinant analyses nutritionnelles, minérales, toxicologiques et sensorielles, puis une évaluation de la stabilité des aflatoxines pendant six mois. Cette organisation expérimentale est cohérente avec l'objectif du nouvel article, qui porte prioritairement sur la formulation, la caractérisation nutritionnelle et la sécurité toxicologique.

III. RESULTATS

III.1. Résultats de la formulation et de la caractérisation nutritionnelle

Cinq formulations d'aliment thérapeutique prêt à l'emploi (ATPE), dénommées F1, F2, F3, F4 et F5, ont été élaborées à partir de différentes proportions d'arachide, de sésame, de graines d'amarante et d'épinard, complétées par les autres ingrédients prévus dans le protocole (Tableau 1). Chaque formulation a été produite en trois lots indépendants et chaque analyse a été réalisée en triple.

Tableau 1. Composition nutritionnelle des différentes formulations d'ATPE pour 100 g

Paramètres	F1	F2	F3	F4	F5	Référence
Energie (kcal)	524 ± 5,8	536 ± 6,1	542 ± 5,4	548 ± 6,2	540 ± 5,6	520–550
Protéines (g)	13,6 ± 0,3	14,7 ± 0,5	15,2 ± 0,4	15,8 ± 0,4	15,0 ± 0,3	13–16
Lipides (g)	28,2 ± 0,7	31,4 ± 0,6	33,1 ± 0,5	34,6 ± 0,8	32,7 ± 0,6	26–36
Glucides (g)	49,4 ± 1,0	45,2 ± 0,9	42,7 ± 1,2	41,2 ± 1,1	43,3 ± 0,8	—
Glucose (g)	10,6 ± 0,4	11,5 ± 0,3	12,1 ± 0,5	12,4 ± 0,4	11,8 ± 0,3	—
Fibres (g)	4,6 ± 0,2	4,1 ± 0,3	3,8 ± 0,2	3,6 ± 0,3	3,9 ± 0,2	<5
Humidité (%)	3,8 ± 0,2	3,2 ± 0,2	2,8 ± 0,1	2,4 ± 0,2	2,7 ± 0,2	—
Cendres (g)	2,3 ± 0,1	2,5 ± 0,1	2,6 ± 0,1	2,8 ± 0,1	2,7 ± 0,1	—

II.12. Analyse statistique

Les données ont été saisies dans Excel puis analysées avec STATA version 16. Les résultats quantitatifs ont été présentés sous forme de moyenne ± écart-type.

La comparaison des cinq formulations pour les paramètres nutritionnels et sensoriels a été réalisée au moyen d'une ANOVA à un facteur, suivie du test post-hoc de Tukey lorsque les conditions d'application étaient satisfaites. La normalité des résidus a été vérifiée par le test de Shapiro-Wilk et l'homogénéité des variances par le test de Levene. Le seuil de significativité était fixé à $p < 0,05$.

Pour comparer les concentrations d'aflatoxines entre T0 et six mois de conservation, un test t apparié a été utilisé.

En résumé, le protocole a permis de comparer cinq formulations d'ATPE préparées en trois lots indépendants, en

La densité énergétique augmente progressivement de 524 kcal/100 g pour F1 à 548 kcal/100 g pour F4, avant de diminuer légèrement à 540 kcal/100 g pour F5. La teneur protéique suit une tendance comparable, passant de 13,6 g/100 g pour F1 à 15,8 g/100 g pour F4. Les lipides varient de 28,2 à 34,6 g/100 g, avec la valeur maximale également observée pour F4.

La formulation F4 présente par ailleurs la plus faible humidité (2,4 %) et la plus faible teneur en fibres (3,6 g/100 g). Globalement, les valeurs énergétiques, protéiques et lipidiques des cinq formulations se situent dans les plages de référence rapportées dans le mémoire.

III.2. Profil lipidique

Tableau 2 : Profil en acides gras des formulations par 100 g d'aliments

Acides gras	F1	F2	F3	F4	F5	Référence nutritionnelle des ATPE
Acides gras saturés	5,4 ± 0,2	6,1 ± 0,2	6,5 ± 0,3	6,8 ± 0,3	6,4 ± 0,2	-
Acide oléique (ω-9)	12,8 ± 0,4	13,9 ± 0,4s	14,5 ± 0,5	15,2 ± 0,5	14,7 ± 0,4	6.9 - 21
Acide linoléique (ω-6)	7,1 ± 0,3	8,0 ± 0,3	8,5 ± 0,4	8,9 ± 0,4	8,6 ± 0,3	9-13
Acide α-linolénique (ω-3)	0,9 ± 0,1	1,1 ± 0,1	1,3 ± 0,1	1,4 ± 0,1	1,2 ± 0,1	1,1 - 1,6

Les résultats du profil lipidique présentés au tableau 2 ci-dessus révèlent une prédominance de l'acide oléique, dont les concentrations varient de 12,8 à 15,2 g/100 g. En revanche, l'acide linoléique (ω-6) présente des concentrations comprises entre 7,1 et 8,9 g/100 g, inférieures à la plage de référence indiquée (9–13 g/100 g).

L'acide α-linolénique (ω-3) varie de 0,9 à 1,4 g/100 g et apparaît légèrement inférieur à la référence dans certaines formulations. F4 présente néanmoins le profil lipidique considéré comme le plus équilibré.

III.3. Composition minérale

La teneur en éléments minéraux en mg 100 g d'aliments est présentée au tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3. Teneur en éléments minéraux pour mg 100 g d'aliments

Minéral	F1	F2	F3	F4	F5
Calcium (Ca)	402,0	362,0	422,9	392,7	358,8
Potassium (K)	796,9	801,0	948,6	1040,0	1196,0
Fer (Fe)	19,06	4,30	9,74	9,23	11,90
Phosphore (P)	226,9	175,7	290,0	286,3	469,0
Zinc (Zn)	42,1	30,1	41,8	46,7	48,4

Les analyses montrent la présence de calcium, potassium, fer, zinc et phosphore dans l'ensemble des formulations. Le potassium est particulièrement élevé dans F4 et F5, avec une valeur maximale rapportée de 1 196 mg/100 g.

Le fer présente une variation importante entre les formulations, avec une valeur maximale de 19,06 mg/100 g dans F1. Les concentrations en zinc se situent entre 30 et 48 mg/100 g, tandis que le phosphore atteint sa valeur maximale dans F5 avec 469 mg/100 g. L'analyse globale du mémoire identifie F4 comme présentant le meilleur équilibre minéral.

III.4. Facteurs antinutritionnels et sécurité toxicologique

Tableau 4. Qualité toxicologique des formulations

Paramètres	F1	F2	F3	F4	F5	LMR
Phytates (mg/100 g)	224,3 ± 10,4	210,7 ± 9,3	198,5 ± 8,5	186,4 ± 8,2	195,8 ± 9,0	< 500
Oxalates (mg/100 g)	84,5 ± 5,2	79,2 ± 4,7	76,4 ± 3,9	72,3 ± 4,2	74,8 ± 4,5	< 200
Tanins (mg/100 g)	110,8 ± 5,8	105,4 ± 5,2	102,6 ± 4,9	96,7 ± 5,3	99,3 ± 5,1	< 200
HCN (mg/100 g)	1,14 ± 0,10	0,96 ± 0,08	0,91 ± 0,09	0,84 ± 0,09	0,88 ± 0,07	< 10

Les différentes formulations présentent des concentrations relativement faibles en facteurs antinutritionnels. Les phytates varient de 186 à 224 mg/100 g. Les teneurs en oxalates et en tanins sont également rapportées comme faibles et relativement stables entre les formulations.

Le cyanure d'hydrogène (HCN) présente des concentrations comprises entre 0,84 et 1,14 mg/100 g, avec les valeurs les plus faibles observées dans les formulations les mieux optimisées. Le mémoire rapporte une diminution progressive des facteurs antinutritionnels de F1 vers F4.

Sur le plan toxicologique, F4 présente les valeurs les plus faibles pour l'ensemble des paramètres toxicologiques, ce qui lui confère le profil de sécurité analytique le plus favorable parmi les formulations étudiées.

Les aflatoxines totales, correspondant à la somme des aflatoxines B1, B2, G1 et G2, ont été suivies immédiatement après production puis après six mois de conservation à température ambiante. Les résultats disponibles indiquent que les concentrations sont demeurées inférieures à 3 µg/kg après six mois de conservation, sans augmentation significative rapportée. Cette observation suggère une bonne stabilité toxicologique des formulations dans les conditions de conservation étudiées.

Il convient néanmoins de considérer ce résultat comme une stabilité analytique sur six mois, et non comme une démonstration d'une durée de conservation commerciale définitive.

III.5. Evaluation des aflatoxines au cours de la conservation

La concentration des aflatoxines totales pendant la conservation est donnée à la figure 1 ci-dessous.

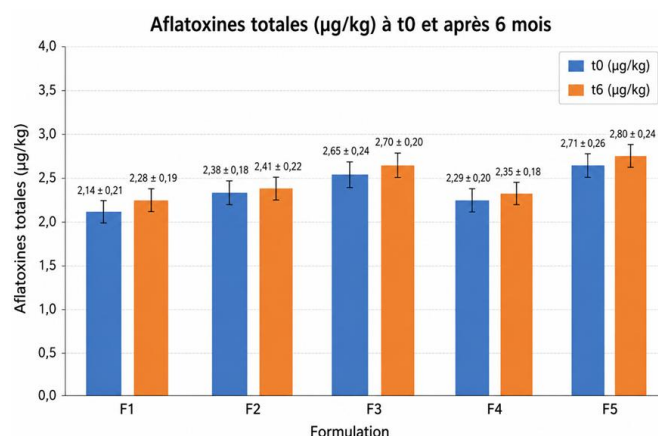


Figure 1. Concentration des aflatoxines totales pendant la conservation

III.6. Acceptabilité sensorielle

L'évaluation sensorielle a montré une amélioration progressive des scores de F1 à F5.

Tableau 5. Scores sensoriels des formulations

Formulation	Couleur /5	Arômes /10	Saveur /10	Consistance /5	Total /30
F1	2,96 ± 1,25	5,91 ± 2,00	6,67 ± 0,15	3,15 ± 0,22	18,69
F2	3,80 ± 0,75	6,31 ± 0,21	6,97 ± 0,34	3,32 ± 0,17	20,40
F3	3,22 ± 1,08	6,43 ± 0,17	7,14 ± 1,30	3,03 ± 1,10	19,82
F4	3,76 ± 0,15	7,48 ± 1,32	7,59 ± 0,85	3,33 ± 1,60	22,16
F5	3,90 ± 0,08	8,35 ± 0,86	8,42 ± 1,06	3,98 ± 0,03	24,65
p ANOVA	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

F5 obtient le meilleur score global avec 24,65/30, suivie de F4 avec 22,16/30. F1 présente le score le plus faible (18,69/30). Les différences entre les cinq formulations sont statistiquement significatives pour chacun des quatre attributs sensoriels ainsi que pour le score total ($p < 0,001$).

F5 obtient notamment les meilleurs scores pour la couleur (3,90/5), les arômes (8,35/10), la saveur (8,42/10) et la consistance (3,98/5).

III.7. Indice prédictif d'efficacité nutritionnelle (IPEN)

L'indice prédictif d'efficacité nutritionnelle (IPEN) des différentes formulations avec d'autres paramètres analysés sont présentés au tableau 6 suivant.

Tableau 6. IPEN et efficacité nutritionnelle prédictive

Formulation	Score énergie	Score protéines	Score lipides	IPEN	Efficacité théorique (%)
F1	0,383	0,258	0,245	0,886	88,6
F2	0,391	0,279	0,272	0,942	94,2
F3	0,396	0,289	0,287	0,972	97,2
F4	0,400	0,300	0,300	1,000	100,0
F5	0,394	0,285	0,283	0,962	96,2

L'indice prédictif d'efficacité nutritionnelle (IPEN) varie de 0,886 à 1,000. La progression est observée de F1 vers F4, avec F4 atteignant la valeur maximale de 1,000. La valeur rapportée pour F1 est de 0,886.

Cette progression accompagne l'augmentation de la densité énergétique, des protéines et des lipides observées dans les formulations. Le mémoire classe ainsi F4 comme la formulation présentant la meilleure performance nutritionnelle prédictive globale.

IV. DISCUSSION

Les résultats de cette étude montrent qu'il est possible de formuler, à partir d'ingrédients alimentaires disponibles localement, un aliment thérapeutique prêt à l'emploi présentant des caractéristiques nutritionnelles et toxicologiques globalement favorables. Cette observation est particulièrement pertinente dans le contexte de la République démocratique du Congo, où la disponibilité et l'accessibilité des ATPE constituent des enjeux importants.

IV.1. Composition nutritionnelle

Les cinq formulations présentaient une densité énergétique de 524 à 548 kcal/100 g, avec une teneur en protéines de 13,6 à 15,8 g/100 g et en lipides de 28,2 à 34,6 g/100 g. F4 se distinguait par les valeurs les plus élevées pour l'énergie, les protéines et les lipides. Ces caractéristiques sont compatibles avec les exigences générales recherchées pour les ATPE, qui doivent fournir une quantité importante d'énergie et de nutriments dans un faible volume [8]. Des études sur des ATPE formulés à partir de matières premières locales ont également rapporté des densités énergétiques et protéiques comparables, confirmant la faisabilité de telles formulations [9,10].

L'amélioration observée de F1 à F4 pourrait s'expliquer par la modification des proportions d'arachide, de sésame et d'amarante. Ces ingrédients sont particulièrement intéressants pour leur contribution énergétique et protéique. Toutefois, une bonne composition brute ne garantit pas nécessairement une biodisponibilité optimale des nutriments ; celle-ci devra être étudiée ultérieurement.

IV.2. Profil en acides aminés

F4 présentait globalement les concentrations les plus favorables en acides aminés essentiels, notamment en lysine, leucine, isoleucine et valine. La complémentarité entre les différentes sources végétales constitue probablement un avantage de la formulation. L'utilisation de plusieurs sources

protéiques peut en effet améliorer la qualité globale du mélange par rapport à l'utilisation isolée d'une seule matière première [10].

Néanmoins, les concentrations d'acides aminés ne permettent pas à elles seules de conclure sur la qualité biologique de la protéine. Une étude de digestibilité et de biodisponibilité serait nécessaire pour confirmer cet avantage.

IV.3. Composition minérale

La présence de calcium, potassium, fer, zinc et phosphore dans les formulations constitue un résultat encourageant. F4 présentait globalement un profil minéral favorable, tandis que certaines formulations se distinguaient pour des minéraux particuliers. Ces résultats sont importants dans le contexte de la MAS, car les déficiences en micronutriments accompagnent fréquemment la dénutrition sévère [8].

Cependant, la comparaison avec un ATPE standard et la détermination de la biodisponibilité des minéraux seraient nécessaires avant de considérer ces formulations comme nutritionnellement équivalentes à un produit thérapeutique homologué. Des travaux réalisés récemment en RDC ont justement montré que certaines préparations locales pouvaient présenter des insuffisances en micronutriments essentiels [11].

IV.4. Facteurs antinutritionnels et sécurité toxicologique

Les teneurs relativement faibles en phytates, oxalates, tanins et HCN constituent un résultat favorable. La réduction de ces composés peut être liée aux traitements technologiques appliqués aux matières premières, notamment la torréfaction, le blanchiment et le séchage.

Cette question est importante car certains facteurs antinutritionnels peuvent limiter l'utilisation biologique de certains minéraux. Le faible niveau observé dans les formulations constitue donc un élément favorable, même si leur impact réel sur la biodisponibilité n'a pas été directement mesuré.

IV.5. Aflatoxines et stabilité

La contamination par les aflatoxines est un point critique dans les formulations contenant de l'arachide. Dans la présente étude, les concentrations sont demeurées inférieures à 3 µg/kg après six mois, sans augmentation significative rapportée. Ce résultat est rassurant et témoigne d'une bonne stabilité dans les conditions de conservation étudiées.

Cette précaution est particulièrement justifiée pour les produits à base d'arachide, compte tenu de la toxicité des

aflatoxines et de l'importance accordée à leur contrôle dans les aliments thérapeutiques [12]. Toutefois, une conservation de six mois ne permet pas à elle seule de fixer une durée de conservation commerciale définitive.

IV.6. Acceptabilité sensorielle

L'évaluation sensorielle met en évidence une différence nette entre les formulations. F5 obtient le meilleur score global (24,65/30), significativement supérieur aux autres formulations ($p < 0,001$). F4, pourtant la plus performante sur le plan nutritionnel, obtient un score sensoriel inférieur à F5.

Cette différence illustre un principe important dans le développement des ATPE : la meilleure formulation nutritionnelle n'est pas nécessairement la plus appréciée sur le plan organoleptique. Des études antérieures ont montré que des ATPE à base d'ingrédients locaux pouvaient être bien acceptés lorsqu'ils étaient adaptés aux préférences alimentaires des populations ciblées [8,13].

Il faut toutefois rester prudent dans l'interprétation de ce résultat puisque le panel était constitué d'étudiants et non d'enfants de 6 à 59 mois souffrant de MAS. L'acceptabilité chez la population cible devra donc être vérifiée ultérieurement.

IV.7. Indice prédictif d'efficacité nutritionnelle

L'IPEN, compris entre 0,886 et 1,000, était maximal pour F4. Cette performance est cohérente avec sa densité énergétique et sa teneur plus élevée en protéines et lipides.

Cependant, il convient de souligner que cet indice constitue un indicateur prédictif et non une mesure d'efficacité thérapeutique clinique. La valeur de 1,000 pour F4 ne signifie donc pas que cette formulation possède une efficacité clinique de 100 %. Une telle conclusion nécessiterait un essai clinique comparatif chez les enfants atteints de MAS.

IV.8. Synthèse

Dans l'ensemble, F4 apparaît comme la formulation la plus intéressante sur le plan nutritionnel et toxicologique, tandis que F5 présente le meilleur profil sensoriel. Cette complémentarité suggère qu'une optimisation ultérieure pourrait rechercher une formulation combinant les caractéristiques nutritionnelles de F4 avec l'acceptabilité de F5.

Ces résultats soutiennent donc la faisabilité d'un ATPE local à base d'arachide, de sésame, de graines d'amarante et d'épinard, mais ils ne permettent pas encore de conclure à son efficacité thérapeutique chez l'enfant.

Limites de l'étude

Malgré l'intérêt des résultats obtenus, cette étude présente certaines limites qu'il convient de prendre en considération dans leur interprétation.

1. **Absence d'essai clinique.** L'étude a porté essentiellement sur la formulation et la caractérisation en laboratoire. Aucune administration de l'ATPE à des enfants atteints de malnutrition aiguë sévère n'a été réalisée. Il n'est donc pas possible d'affirmer une efficacité thérapeutique clinique sur la récupération pondérale, la réduction de la durée de traitement ou la mortalité.

2. **Biodisponibilité des nutriments non évaluée.** La teneur en fer, zinc, calcium et autres minéraux a été déterminée, mais leur biodisponibilité réelle n'a pas été étudiée. La présence de phytates, oxalates et tanins peut en effet influencer l'absorption de certains micronutriments.

3. **Évaluation sensorielle limitée.** L'acceptabilité a été appréciée auprès de 80 étudiants adultes et non auprès de la population cible constituée d'enfants de 6 à 59 mois souffrant de MAS. Les résultats sensoriels, notamment la supériorité de F5, doivent donc être interprétés avec prudence.

4. **Durée de conservation limitée.** La stabilité des aflatoxines a été évaluée pendant six mois à température ambiante. Cette période ne permet pas de déterminer avec certitude la durée maximale de conservation du produit dans différentes conditions climatiques. Le mémoire souligne également la nécessité d'études prolongées dans différentes conditions de température et d'humidité.

5. **Variabilité des matières premières.** Les ingrédients provenaient d'approvisionnements locaux et leur composition peut varier selon la saison, l'origine géographique, les conditions de culture et de stockage. Cette variabilité pourrait influencer la composition nutritionnelle et toxicologique des lots futurs.

6. **Évaluation économique non approfondie.** Le coût de production à grande échelle, le coût par enfant traité et la comparaison économique avec un ATPE standard n'ont pas été suffisamment documentés.

Ces limites n'annulent pas la portée des résultats, mais indiquent que les formulations étudiées doivent être considérées comme des prototypes prometteurs nécessitant une validation complémentaire.

V. CONCLUSION

Cette étude avait pour objectif de formuler, caractériser sur le plan nutritionnel et évaluer la sécurité toxicologique d'un aliment thérapeutique prêt à l'emploi à base d'arachide, de sésame, de graines d'amarante et d'épinard.

Les résultats montrent qu'il est techniquement possible d'élaborer, à partir de ressources alimentaires locales, des formulations présentant une densité énergétique élevée, une teneur appréciable en protéines et en lipides et un profil minéral intéressant. Parmi les formulations étudiées, F4 s'est distinguée par les meilleures performances nutritionnelles, avec 548 kcal/100 g, 15,8 g de protéines/100 g, 34,6 g de lipides/100 g et un IPEN de 1,000.

Sur le plan toxicologique, les concentrations des facteurs antinutritionnels sont demeurées relativement faibles et les aflatoxines sont restées inférieures à 3 µg/kg après six mois de conservation. Ces résultats constituent des éléments favorables en matière de sécurité analytique.

Sur le plan sensoriel, F5 a obtenu la meilleure acceptabilité, avec un score global de 24,65/30. Cette différence avec F4 montre que l'optimisation d'un ATPE doit rechercher simultanément la qualité nutritionnelle, la sécurité et l'acceptabilité.

Ainsi, les résultats confirment la faisabilité de la formulation d'un ATPE local à partir d'arachide, de sésame, de graines d'amarante et d'épinard. Toutefois, ils ne permettent pas encore de conclure à une efficacité thérapeutique chez l'enfant. F4 peut être considérée comme la formulation la plus prometteuse sur le plan nutritionnel, tandis que F5 présente un avantage sensoriel.

REFERENCES

1. World Health Organization. WHO guideline on the prevention and management of wasting and nutritional oedema (acute malnutrition) in infants and children under 5 years. Geneva: World Health Organization; 2023.
2. World Health Organization. WHO guideline on the dairy protein content in ready-to-use therapeutic foods for treatment of uncomplicated severe acute malnutrition. Geneva: World Health Organization; 2021.
3. Bosonkie M, Mudogo CN, Silverstein H, Fawole OI, Compta G, Ngbolua KT-N, et al. Comparison of the nutritional value of locally formulated food

- preparations and standard ready-to-use therapeutic foods for the management of uncomplicated severe acute malnutrition in children under five in the Democratic Republic of the Congo. *Food Sci Nutr.* 2025;13(12):e71302.
4. World Health Organization. WHO guideline on the dairy protein content in ready-to-use therapeutic foods for treatment of uncomplicated severe acute malnutrition. Geneva: World Health Organization; 2021.
 5. World Health Organization. Micronutrient intake in children with severe acute malnutrition. Geneva: World Health Organization; 2023.
 6. Codex Alimentarius Commission. Guidelines for ready-to-use therapeutic foods (RUTF). Rome: FAO/WHO; 2023. (CXG 95-2022).
 7. FAO/WHO Codex Alimentarius. Expert advice on appropriate criteria and limits for contaminants in ready-to-use therapeutic foods. Rome: FAO/WHO; 2018.
 8. World Health Organization. WHO guideline on the prevention and management of wasting and nutritional oedema (acute malnutrition) in infants and children under 5 years. Geneva: WHO; 2023.
 9. Choudhury N, Ahmed T, Hossain MI, Islam MM, Sarker SA, Zeilani M, et al. Ready-to-use therapeutic food made from locally available food ingredients is well accepted by children having severe acute malnutrition in Bangladesh. *Food Nutr Bull.* 2018;39(1):116-126.
 10. Weber JM, Callaghan M. Optimizing ready-to-use therapeutic foods for protein quality, cost, and acceptability. *Food Nutr Bull.* 2016;37(1 Suppl):S37-S46.
 11. Bosonkie M, Mudogo CN, Silverstein H, Fawole OI, Compta G, Ngbolua KT-N, et al. Comparison of the nutritional value of locally formulated food preparations and standard ready-to-use therapeutic foods for the management of uncomplicated severe acute malnutrition in children under five in the Democratic Republic of the Congo. *Food Sci Nutr.* 2025;13(12):e71302.
 12. Codex Alimentarius Commission. Guidelines for ready-to-use therapeutic foods (RUTF). Rome: FAO/WHO; 2022.
 13. Purwestri RC, Scholl C, Wieringa FT, et al. Ready-to-use therapeutic foods based on local recipes are as efficacious and have a higher acceptability than a standard peanut-based RUTF: a randomized controlled trial in Indonesia. *Nutrients.* 2023;15(15):3385.