

Disponibilité et technologies d'amélioration des teneurs en lysine et en méthionine des ingrédients utilisés dans l'alimentation des porcs et des poulets: Revue de littérature

[Availability and technologies for improving lysine and methionine levels of ingredients used in pig and chicken feed: Literature review]

Isidor Zangbéwindin OUEDRAOGO^{1,2}, Timbilfou KIENDREBEOGO^{1,3,4}, Salam Richard KOMDOMBO³, Pierre Alexandre Eric Djifaby SOMBIÉ⁴, Saliou NGOM⁵, Lassina OUATTARA⁶, Logténé Youssoufou MOPATE⁷, Aboubacar TOGUYENI¹, and Chantal Yvette KABORE-ZOUNGRANA¹

¹Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Ressources Naturelles et les Sciences de l'Environnement (LERNSE), Université Nazi Boni, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

²Ministère de l'Agriculture, des Ressources Animales et Halieutiques (MARA), Ouagadougou, Burkina Faso

³Laboratoire de Recherche en Production et Santé Animale (LRPSA), Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA), Ouagadougou, Burkina Faso

⁴Laboratoire Central D'Horticulture (LCH), Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA), Ouagadougou, Burkina Faso

⁵Direction de la Protection des Végétaux (DPV), Dakar-Mbatal, Senegal

⁶Département de Sciences Biologiques, Unité de Formation et de Recherche en Sciences de la Vie et de la Terre, Université Nazi BONI, 01 BP 1091 Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso

⁷Institut de Recherche en Elevage pour le Développement (IRED), Programme Production Animale et Environnement BP 433, N'Djamena, Chad

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This study reviews the current state of knowledge on the roles of lysine and methionine in monogastric nutrition, and their potential availability in feedstuffs for pigs and chickens in Burkina Faso. It aims to better orient ongoing research to make these amino acids more available and optimize their content in local feed resources and their use in the rationing of pigs and chickens on intensive farms in Burkina Faso. Searches carried out mainly online using the Google Scholar search engine yielded a wide range of documents, which were filtered to retain only the most significant ones dealing with the above-mentioned themes. A total of 294 documents were identified, from which 126 references were selected and used for this literature review. Lysine and methionine are the most limiting amino acids in pig and chicken feed, in that their deficiency in rations affects feed efficiency, leads to reduced growth and dysfunctions in the organism. The methionine and lysine used in Burkina Faso are imported synthetic products that are not easily accessible due to their high cost. Their availability in certain ingredients can be improved by germination and/or heat treatment. Compliance with recommended lysine and methionine requirements in formulations for pigs and chickens is essential to optimize their utilization by the body, while reducing nitrogen losses and ensuring good productivity.

KEYWORDS: Availability, Lysine and Methionine, Local feeds, Optimization of contents, Rationing, Pigs and chickens, Burkina Faso.

RESUME: L'étude fait l'état des connaissances sur les rôles de la lysine et la méthionine dans la nutrition des monogastriques, leur disponibilité potentielle dans les aliments utilisés en alimentation des porcs et des poulets au Burkina Faso. Elle vise à mieux orienter des recherches en cours pour rendre plus disponibles ces acides aminés et optimiser leurs teneurs dans les ressources alimentaires locales et leurs utilisations dans le rationnement des porcs et des poulets des élevages intensifs du Burkina Faso. Des recherches faites principalement en ligne sur le moteur de recherche Google Scholar ont permis d'inventorier une large gamme de documents qui ont été filtrés pour n'en retenir que les plus significatifs traitant des thématiques ci-dessus indiqués. Au total, 294 documents ont été inventoriés parmi lesquels 126 références ont été retenues et exploitées pour cette synthèse documentaire. La lysine et la méthionine sont les acides aminés les plus limitants dans l'alimentation des porcs et des poulets en ce sens que leur carence dans les rations affecte l'efficacité alimentaire, entraîne une baisse de croissance et un dysfonctionnement de l'organisme. La méthionine et la lysine utilisés au Burkina Faso sont des produits de synthèse importés, peu accessibles à cause de leur cherté. Leur disponibilité dans certains ingrédients peut être améliorée par la germination et/ou des traitements thermiques. Le respect des besoins en lysine et en méthionine recommandés dans les formulations destinées aux porcs et poulets est primordial pour optimiser leur utilisation par l'organisme tout en réduisant les pertes d'azote et assurer une bonne productivité.

MOTS-CLEFS: Disponibilité, Lysine et Méthionine, Aliments locaux, Optimisation des teneurs, Rationnement, Porcs et poulets, Burkina Faso.

1 INTRODUCTION

L'élevage occupe une place importante dans l'économie mondiale et le bien-être de l'humanité [1] avec 1,3 milliard de personnes qui tirent des revenus de cette activité [2]. En Afrique subsaharienne, l'élevage contribue pour une part importante au développement économique des pays. Il fournit des protéines d'origine animale pour assurer une alimentation équilibrée aux populations et constitue une source d'emploi et un moyen de lutte contre la pauvreté [3], [4]. Dans cette partie de l'Afrique où la contribution de l'élevage au produit intérieur brute (PIB) et au PIB agricole respectivement comprise entre 10-20 % et 50-80 % [5], deux types d'élevages se côtoient: l'élevage des ruminants domestiques avec une alimentation essentiellement basée sur l'exploitation des pâturages naturels et celui des monogastriques parmi lesquels les porcs et la volaille dont l'alimentation est basée sur les aliments concentrés sources de protéines et surtout d'énergie [3]. La production des monogastriques à cycles courts a connu un développement rapide depuis 1960, avec une progression des effectifs de plus de 280% pour la volaille et plus de 200% pour les porcs [6], [7]. Au Burkina Faso, ce type d'élevage est en plein développement et les espèces élevées prennent de plus en plus de l'importance au plan socio-économique pour les populations [8], [9]. Parmi les monogastriques qui y sont élevés, les volailles (42 millions têtes) et les porcins (2 millions de têtes) sont les plus nombreux [9] et on assiste depuis plusieurs années à l'émergence et au développement d'élevages intensifiés de porcs et de poulets (chair et pondeuses) dans les zones périphériques des grandes villes comme Ouagadougou et Bobo-Dioulasso [10], [11], [12]. Le développement de ce type d'élevage se bute à un problème majeur d'ordre alimentaire expliqué généralement par la faible disponibilité et la cherté des aliments conventionnels. D'autres facteurs explicatifs qui influencent négativement les performances zoo-économiques de l'élevage des monogastriques sont moins connus ou perçus, comme celui des carences en acides aminés indispensables (AAI) dans les rations distribuées aux porcs et aux volailles. C'est le cas contraire chez les ruminants où les carences des aliments distribués en AAI sont compensées par leur capacité à transformer les aliments grossiers en protéines de haute valeur nutritive grâce à la digestion microbienne qui y est plus importante [13]. Au Burkina Faso, les aliments les plus importés pour ce type d'élevage (porcs et poulets) concernent les farines de poissons, le fer, les phosphates, des concentrés spécifiques (chair, ponte, etc.) et des acides aminés de synthèse, en particulier la lysine et la méthionine. Ces deux acides aminés indispensables sont connus d'utilisation courante dans les fabriques d'aliments commercialisés et par certains éleveurs dans leurs propres formulations. Or, bien plus que les autres aliments conventionnels les coûts des AAI sont très élevés et leur disponibilité connaît des ruptures fréquentes puisque tributaire des importations. Plusieurs études réalisées au Burkina Faso proposent des aliments alternatifs à la faible disponibilité et à la cherté des sources conventionnelles de protéines d'origine animale (farine de poisson) [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20] et végétale (tourteaux de coton et de soja, graine torréfiés de soja) [21], [22], [23], [24]. En dépit de la diversité et de l'importance de ces études, force est de constater qu'elles se sont peu ou pas préoccupées des teneurs potentielles et les apports en AAI en l'occurrence en lysine et méthionine des ressources alimentaires conventionnelles comme solution alternative aux acides aminés de synthèse dans l'alimentation des monogastriques porcs et volailles. Les formulations d'aliments font recours, dans bien des cas, à des valeurs d'analyses bromatologiques d'ingrédients exogènes pour équilibrer les teneurs en lysine et en méthionine des rations, ce qui peut constituer des sources d'erreurs dans les prévisions nutritionnelles. Pourtant la valeur nutritionnelle d'une protéine alimentaire dépend de sa composition en AAI [26] et la maîtrise de leurs teneurs dans les aliments permettrait d'améliorer la disponibilité et l'efficacité de leur utilisation dans les pratiques de rationnement des monogastriques. La présente revue de littérature vise à faire le point sur l'état des connaissances du potentiel en lysine et en méthionine

des ingrédients alimentaires conventionnels ou non conventionnels utilisés dans le rationnement des porcs et la volaille. Elle vise également à faire le point sur les technologies et/ou procédés permettant de mettre à la disposition des monogastriques la lysine et la méthionine de certains ingrédients qui entrent dans la formulation des aliments des porcs et de la volaille.

2 MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

La démarche méthodologique s'est principalement basée sur la recherche documentaire, la lecture et l'exploitation des documents consultés. Cela a permis de traiter 02 parties qui sont (i) les sources alimentaires de lysine et de méthionine et leur utilisation dans l'alimentation des monogastriques porcs et poulets et (ii) l'estimation des besoins annuels en lysine et en méthionine nécessaires pour l'alimentation des porcs et des poulets en élevage intensif au Burkina Faso.

La recherche documentaire a été principalement réalisée en ligne. Pour retrouver les documents adéquats à exploiter, des recherches ont été effectuées en anglais et en français en utilisant le moteur de recherche Google scholar. Pour cela, les mots-clés suivants ont été introduits: « protéines OU/ET acides aminés », « acides aminés OU/ET essentiels », « acides aminés OU/ET indispensables », « Lysine OU/ET méthionine », « protéines OU/ET lysine », « protéines OU/ET méthionine », « poulets OU/ET lysine », « poulets OU/ET méthionine », « porcs OU/ET lysine », « porcs OU/ET méthionine », « sources OU/ET acides aminés », « source OU/ET lysine », « source OU/ET méthionine », « technologies OU/ET Traitements ». Les consultations de documents ont souvent conduit vers d'autres sites comme ResearchGate, HAL-AgroParisTech, Wiley Online Library, BMJ Nutrition Prevention and Health, MDPI, Agritrop, Cirad qui ont été utilisés pour perfectionner la recherche. Les documents consultés datent de 1990 à 2022. Ces différentes recherches ont permis de consulter plusieurs documents (articles scientifiques, mémoires, des livres et des thèses) parmi lesquels 294 ont été enregistrés sur Zotero. Au total, 126 documents scientifiques ont été effectivement exploités pour la réalisation de cette revue de littérature. Tous les documents retenus ont été rassemblés en 05 groupes thématiques à savoir:

- Protéines et élevage des monogastriques;
- Acides aminés et alimentation des porcs;
- Acides aminés et alimentation des poulets;
- Sources des acides aminés;
- Technologies d'amélioration des sources d'acides aminés.

L'évaluation des besoins quantitatifs en lysine et en méthionine des élevages intensifs de porcs et de poules au Burkina Faso a été faite par des calculs sur la base des effectifs des poules et des porcs élevés dans ce système en utilisant les données statistiques sur le cheptel national rapportés par le Ministère des Ressources Animales et Halieutiques (MRAH) en 2018. Ces calculs ont considéré par ailleurs les taux d'incorporation moyens en lysine et en méthionine dans l'aliment des porcs et volailles recommandés par [27], [28], [29], [30], [31], [32]. Les consommations alimentaires moyennes ont été obtenues en faisant la moyenne des consommations recommandées par [16], [17], [19], [20], [22], [25], [33], [34] pour les poulets et [35] pour les porcs. Les coûts du kilogramme de lysine et de méthionine retenus pour les calculs étaient respectivement 2 800 et 5 000 FCFA.

3 DÉFINITION DES PROTÉINES ET DES ACIDES AMINÉS

Les protéines, du grec « protos » qui signifie « primordial, primitif », sont des composés organiques constitués de carbone (C), d'hydrogène (H), d'oxygène (O) et d'azote (N), auxquels s'ajoute parfois le soufre (S) aminé [36]. Les protéines sont constituées de 20 acides aminés [36], [37] parmi lesquels, neuf (valine, leucine, isoleucine, thréonine, méthionine, lysine, phénylalanine, tryptophane et l'histidine) sont indispensables et doivent être apportés par l'alimentation car l'organisme ne peut pas les synthétiser à une vitesse suffisante pour assurer le maintien des fonctions biologiques associées [36], [38], [39], [40]. A partir de ces 20 acides aminés l'organisme des animaux peut synthétiser toutes les protéines nécessaires à ses besoins d'entretien (renouvellement des protéines corporelles) et de production (croissance) [37]. Les anticorps d'un système immunitaire sont des protéines chargées de défendre un organisme contre les bactéries et les virus [41]. Elles sont les plus abondantes des molécules organiques des cellules et constituent souvent plus de 50% du poids sec des êtres vivants et jouent un rôle fondamental dans la structure et les fonctions cellulaires et c'est par elles que l'information génétique s'exprime [42]. En outre, les protéines contribuent également à l'apport énergétique (1 gramme de protéines apporte 4 kilocalories) et sont présentes dans les produits animaux et végétaux [36], [43]. La teneur en protéines, d'une matière première ou d'un aliment, est estimée indirectement à partir de la matière azotée totale (MAT) aussi appelée protéine brute. Elle est calculée en multipliant la teneur en azote total de l'aliment par le coefficient de Jones égal à 6,25, en considérant que les protéines contiennent en moyenne 16% d'azote ($100/16 = 6,25$) [44]. La teneur en azote des protéines est fonction de la composition de celles-ci en acides aminés puisque la teneur en azote de ceux-ci varie de 8% à 32% [37]. Elles sont essentielles dans l'alimentation des monogastriques (homme, porc et la volaille) [45] et leurs carences dans l'aliment provoquent une baisse de croissance et des dysfonctionnements de l'organisme [38].

4 L'IMPORTANCE DES PROTÉINES ET DES ACIDES AMINÉS DANS L'ALIMENTATION ANIMALE

Le rôle nutritionnel des protéines est de fournir des acides aminés, de l'azote et de l'énergie, substrats nécessaires à la synthèse des protéines et des différents composés azotés de l'organisme [43]. Les protéines sont des composés alimentaires qui satisfont les besoins alimentaires des animaux [42]. Pour toutes les espèces animales, les besoins nutritionnels en protéines et en AAI varient d'un individu à l'autre selon l'âge, l'état physiologique, le génotype, le sexe et l'environnement climatique ou sanitaire [46]. Le concept de protéine « idéale » correspond à un équilibre général des acides aminés alimentaires digestibles qui couvre exactement le besoin de l'animal et permet ainsi de minimiser le catabolisme des acides aminés et, par voie de conséquence, les rejets d'azote [47]. Contrairement à la synthèse des protéines qui suit un schéma identique chez les animaux et les végétaux ; celle des acides aminés est toute différente car les végétaux en fabriquent à la demande alors que les cellules animales ne les retrouvent que dans l'alimentation [48]. Certains acides aminés peuvent être limitants et leur carence dans la ration empêche l'utilisation des autres acides aminés de la ration. La consommation d'une ration déséquilibrée en protéines ou en AAI peut réduire les performances des animaux alors qu'un apport alimentaire adéquat en protéines et en acides aminés est nécessaire pour maintenir une immunocompétence normale et protéger l'hôte contre diverses maladies chez toutes les espèces [49]. Les déséquilibres en protéines ou en AAI peuvent être classés en plusieurs catégories parmi lesquelles les notions de carence et toxicité sont plus citées.

Sur le plan carenciel, un régime déficitaire en protéines ou en AA provoque une baisse de croissance chez les porcs et les poulets [45], [49]. La présence sur le marché d'AAI de synthèse tels que la L-lysine, la L-méthionine, la L-thréonine, L-tryptophane et L-valine permet la formulation des régimes hypo protéinés avec un AAI bien équilibré. Cependant, réduire la teneur en protéines de l'aliment tout en maintenant des performances optimales de l'animal n'est possible que s'il existe une connaissance précise des besoins en tous les acides aminés [39].

La toxicité résulte de l'ingestion d'une quantité excessive de protéines ou d'AAI [37]. Un apport excédentaire en protéines dans l'aliment des porcs et les poulets entraîne une diminution de la vitesse de la protéosynthèse [50] et une excrétion d'azote qui est rejetée dans l'environnement [47]. Chez le porcelet, la méthionine est l'AAI le plus toxique et un apport de 2% de DL-méthionine libre dans un aliment contenant 20% de protéines réduit fortement la consommation et le gain de poids [37].

4.1 LES PROTÉINES ET LES ACIDES AMINÉS DANS L'ALIMENTATION DES PORCS

La protéine est un nutriment relativement cher et de nombreux pays dépendent des sources de protéines importées pour l'alimentation des animaux. La connaissance des besoins en protéines et en acides aminés et de la réponse des porcs à l'apport d'acides aminés est essentielle dans la formulation des aliments [39]. Pour les porcelets de moins de 25 kg, l'expression d'une vitesse de croissance maximale est conditionnée par la distribution d'un aliment riche en protéines avec un profil d'acides aminés qui répond exactement aux besoins de l'animal. Une ration pauvre en acides aminés entraîne une baisse des performances de croissance tandis qu'un apport en excès est coûteux et favorise la prolifération des bactéries pathogènes causant des diarrhées de post-sevrage. L'excès d'acides aminés dans les aliments conduit à une excrétion excessive d'azote avec un impact environnemental potentiellement négatif [37]. Les besoins en acides aminés des porcs en croissance sont déterminés par le dépôt de protéines dans l'organisme et, pour les truies allaitantes, par les protéines exportées dans le lait [51]. Chez l'animal en croissance-finition, les protéines peuvent être utilisées comme source d'énergie lorsque l'apport énergétique est limitant [52]. Des études ont montré que l'incorporation des acides aminés de synthèse permet d'améliorer l'efficacité alimentaire des porcs tout en diminuant la teneur en protéines dans la ration [53]. Selon ces auteurs, cette technique permet aussi de maintenir les performances de croissance des porcs tout en diminuant les pertes d'azote dans la nature. Cette pratique est la bienvenue dans la mesure où les performances des animaux sont maintenues avec une réduction de l'impact sur l'environnement. L'adoption d'une telle pratique par les éleveurs de porcs et de poulets au Burkina n'est pas sans contraintes car ces AAI coûtent très chers et les éleveurs ne maîtrisent pas leurs modes d'utilisation.

4.2 LES PROTÉINES ET LES ACIDES AMINÉS DANS L'ALIMENTATION DES POULETS

La connaissance des besoins en protéines et en acides aminés des volailles reste un enjeu majeur car elle conditionne à la fois les performances, la qualité des produits, le coût de revient et les rejets environnementaux [54]. C'est ainsi que l'amélioration du potentiel de croissance des animaux et la transformation efficace des aliments en protéines animales ont constitué depuis longtemps des objectifs prioritaires en aviculture. Pour les poulets en croissance, la nature, la quantité et la qualité des protéines ingérées influence le dépôt de protéines corporelles au niveau des muscles [50]. Contrairement au porc, pour lequel la réduction des apports protéiques ne semble pas entraver les performances de croissance lorsque les AAI sont apportés selon les besoins [55], il existe chez le poulet de chair une variabilité importante des performances en réponse à une variation d'apport en protéine alimentaire. Chez le poulet en croissance, la vitesse de synthèse des protéines au niveau du corps entier exprimée en gramme/jour augmente significativement avec les quantités

croissantes de protéines dans le régime jusqu'à la valeur de 20% de protéines dans l'aliment. Au-dessus de cette valeur aucune augmentation supplémentaire n'est observée [50]. Les références [56] et [57] ont montré que la réduction du taux de protéines dans une ration complétementée avec des AAI réduisait les rejets d'azote et n'affecte pas les poids vifs des poulets. Cependant, la réduction du taux de protéines augmente la conversion alimentaire et entraîne une augmentation du dépôt de graisse dans la cavité abdominale des poulets conduisant à des poids de carcasse plus faibles. Les résultats de des études menées par [56] ont montré que la baisse du niveau de protéines dans la ration des poules pondeuses entraînait une baisse du poids corporel, du poids des œufs, du taux de ponte et la consommation alimentaire. L'élevage intensif de poulets est en pleine développement au Burkina Faso et l'approvisionnement en intrants est fortement dépendant de l'extérieur. La plupart des intrants importés sont les sources de protéines et les acides aminés.

5 IMPORTANCE LA LYSINE ET LA MÉTHIONINE DANS L'ALIMENTATION DES PORCS ET LES POULETS

La lysine et la méthionine sont deux acides aminés indispensables qui jouent un rôle très important dans l'alimentation animale [58], [59]. L'homme et les animaux sont incapables de les synthétiser et ils doivent être apportés par l'alimentation [36], [40].

5.1 LA LYSINE DANS L'ALIMENTATION DES PORCS ET LES POULETS

La lysine est le premier acide aminé limitant dans l'alimentation typique des porcs et la volaille et sa carence dans l'aliment a un impact négatif sur la santé et leurs performances de croissance [60], [61], [62]. D'un point de vue réglementaire, la lysine intervient dans le contrôle du métabolisme des acides aminés et peut également affecter le métabolisme d'autres nutriments tout en améliorant la croissance musculaire des animaux [62]. Chez les porcs et le poulet, l'amélioration de l'efficacité alimentaire et la croissance pondérale sont conditionnées par un apport en acides aminés tels que la lysine et la méthionine [61], [62]. Ces mêmes auteurs affirment que même à forte dose de supplémentation la lysine alimentaire ne semble pas être toxique, l'accent nutritionnel doit être mis sur la supplémentation en lysine pour éviter sa carence plutôt que sa toxicité. Chez le poulet et le porc en croissance, la carence d'une ration en lysine provoque une diminution du bilan azoté [63], [64] tout en favorisant le stockage de l'énergie sous forme de gras ou de glycogène musculaire [31]. Selon la référence [65] la carence en lysine ou en méthionine chez la poule pondeuse, réduit la synthèse protéique au niveau du corps entier et des tissus impliqués dans la formation des protéines de l'œuf. Pour assurer une croissance et une efficacité alimentaire optimales des porcs, les taux moyens d'incorporation de la lysine dans l'aliment sont de 1,13%; 0,77% et 0,72%, respectivement pour les porcelets, les porcs en engraissement et les porcs en finition [27], [28], [37], [46]. Les travaux de [27] ont montré qu'une réduction du taux de lysine dans une ration augmentait la consommation alimentaire chez les porcelets, mais pas chez les porcs en croissance et en finition. Les taux d'incorporation de la lysine conseillés dans l'aliment des poulets sont de 1,2; 0,97 et 0,85% respectivement pour les poussins, les poulets en croissance et les poulets en finition [66]. L'alimentation des poulets de chair avec des régimes riches en lysine (1,2%) augmente de manière significative la consommation d'aliments et le gain de poids corporel mais sans aucun effet sur l'indice de conversion alimentaire. Ce niveau de lysine augmentait significativement le poids du coussinet adipeux abdominal, du gésier et du cœur par rapport au groupe standard ayant consommé une ration titrant 1% de lysine [61]. Avec l'utilisation des acides aminés de synthèse commercialisés aujourd'hui, le taux de protéines dans le régime peut être réduit de 20% à 17%; permettant une réduction des rejets d'azote de 32 g à 25 g par kg de gain en finition. En contrepartie l'aliment serait consommé en quantité un peu plus importante et risquerait de coûter plus cher [47].

5.2 LA MÉTHIONINE DANS L'ALIMENTATION DES PORCS ET LES POULETS

La méthionine est un acide aminé limitant indispensable sur le plan nutritionnel et est unique parmi les acides aminés indispensables en raison de son atome de soufre [67], [68]. La méthionine remplit plusieurs fonctions physiologiques liées à la croissance, au développement, à l'immunité et à la reproduction en tant que bloc de construction pour la biosynthèse des protéines et des peptides [69]. Elle est essentielle au maintien d'une croissance et d'un développement appropriés chez les mammifères, et son apport dans l'aliment des animaux domestiques, tels que les poulets et les porcs, contribue à une meilleure efficacité de la production [70]. D'un point de vue réglementaire, la méthionine est un acide aminé initiateur de la traduction universelle des protéines et de nombreux composés bioactifs [50], [67], [71], [72]. La forme commerciale de la méthionine alimentaire est la DL-Met (pure à 99 %) qui a été synthétisée chimiquement pour la première fois par une société française d'additifs alimentaires en 1945 [59]. Une supplémentation en méthionine exogène peut améliorer l'efficacité de l'utilisation des protéines alimentaires par les porcs et la volaille lorsque la méthionine alimentaire est limitante [59], [73]. La méthionine est le premier acide aminé limitant dans l'alimentation de la volaille et de ce fait sa carence affecte les paramètres de production tels que les gains de poids corporel, l'indice de conversion alimentaire et la qualité de la carcasse [69]. Les effets régulateurs de la méthionine sur les performances de croissance et le rendement en viande de poitrine ont été démontrés chez les poulets de chair [74], [75]. La référence [76] a rapporté que les porcs nourris avec un régime titrant 0,23% en méthionine avaient un gain de poids corporel inférieur et un dépôt de lipides plus élevé que les porcs nourris avec un régime titrant 0,48% en méthionine. Cependant, un apport excessif en méthionine entraîne une anémie hémolytique et des changements dans la morphologie des tissus,

tels que l'assombrissement et l'élargissement de la rate [77]. Selon la référence [78] la toxicité de la méthionine est plus prononcée que les toxicités des autres acides aminés et un apport de 2% de méthionine d'un aliment contenant 20% de MAT réduit fortement la consommation alimentaire et le gain de poids [37]. Pour ce même auteur, le taux d'incorporation des AAI ne devrait pas dépasser 1% dans l'aliment des porcs. Les résultats de nombreuses études [27], [69], [76], [79] sur des poulets et porcs indiquent que leurs besoins en méthionine dépendent du stade physiologique.

6 ESTIMATION DES BESOINS ANNUELS EN LYSINE ET EN MÉTHIONINE DES PORCS ET DES POULETS EN ÉLEVAGE INTENSIF AU BURKINA FASO

Les besoins annuels en lysine et en méthionine des porcs et des poulets élevés dans le système intensif ont été estimés et consignés dans le Tableau 1. Ces besoins sont estimés à 1951,55 tonnes lysine et 912,014 tonnes de méthionine. Les parts de lysine et de méthionine destinée aux porcs représentent respectivement 58,04% et 61,58% contre 41,96% et 38,42% pour les poulets. Le coût total des besoins en ces AAI s'élèveraient à 10 024 453 408 FCFA, représentant 2% du budget en cours d'exercice 2023 du pays. Pour un pays en voie de développement comme le Burkina Faso, où les éleveurs sont dans leur majorité pauvres et contraints à des déplacements massifs du fait de l'insécurité, des solutions doivent être trouvées sur le plan local pour diminuer l'utilisation des AAI qui sont importés et vendus cher sur le marché. Les décideurs doivent encourager et accompagner les chercheurs pour la recherche des alternatives locales en vue de substituer totalement ou partiellement ces AAI dans l'alimentation des animaux.

Tableau 1. Besoins et coûts annuels estimés en lysine et en méthionine des porcs et des poulets élevés en système intensif au Burkina Faso

Acides aminés	Quantités (tonnes)	Besoins des poulets (%)	Besoins des porcs (%)	Coûts (FCFA)
Lysine	1 951,565	41,96	58,04	5 464 381 096
Méthionine	912,014	38,42	61,58	4 560 072 312
Montant total/an (FCFA)				10 024 453 408

7 SOURCES POTENTIELLES DE LYSINE ET DE MÉTHIONINE UTILISÉES DANS L'ALIMENTATION DES PORCS ET LA VOLAILLE

Dans la formulation des aliments pour volaille et porcs, les matières premières énergétiques, et protéiques constituent les composants les plus importants [80]. Les produits végétaux et animaux sont les deux sources de protéines et d'acides aminés les plus importantes dans l'alimentation des volailles et des porcs [81], [82]. Il existe deux sources d'acides aminés utilisées en alimentation animale: les acides aminés d'origine végétale et animale [83]. La lysine et la méthionine ont des teneurs plus élevées dans les produits animaux que dans les sources d'origine végétale [84].

7.1 SOURCES D'ORIGINES VÉGÉTALES

La majorité des besoins en protéines alimentaires d'un animal est fournie par des sources de protéines végétales. Dans la nature, les acides aminés se trouvent dans les produits végétaux et animaux [83]. Les protéines végétales sont généralement moins chères que les protéines animales. Cependant, elles sont relativement plus faibles en certains acides aminés indispensables, et certaines peuvent avoir une digestibilité légèrement inférieure [85]. Il existe une limite à leur incorporation dans les rations du fait de leur teneur élevée en facteurs antinutritionnels [86], [87]. Une alimentation composée uniquement de ressources végétales expose à un risque d'insuffisance d'apports en acides aminés essentiels [89], [90], [91]. Parmi les produits végétaux, les sources importantes de protéines sont les produits céréaliers et les légumineuses. Les graines de légumineuses accumulent des quantités importantes de protéines [92] qui sont particulièrement riches en lysine. Elles sont majoritairement utilisées en alimentation animale en complément des grains de céréales plus pauvres en protéines et en lysine [93]. La classification des acides aminés des protéines végétales indique que la lysine est très élevée dans les graines de légumineuses alors que la méthionine est élevée dans les céréales [94], [95]. La méthionine est le premier acide aminé limitant dans les régimes de farine de maïs et de soja pour les volailles [72]. En raison de leur carence en certains acides aminés, les protéines végétales nécessitent généralement une source supplémentaire d'acides aminés ou d'autres sources de protéines telles que les protéines animales [96].

7.2 SOURCES D'ORIGINES ANIMALES

La physiologie des monogastriques d'élevage (porcs et volailles) requiert la présence de protéines animales dans leur alimentation pour compenser l'impossibilité de synthèse de certains acides aminés [62], [97]. Ainsi dans la nature, les porcs et les volailles prélèvent les insectes, les vers et les mollusques. Dans les élevages intensifs, les aliments commerciaux (proviendes) doivent contenir des protéines

animales (farines de viande ou de poisson, d'insectes) pour assurer une croissance et une production normales [17], [45], [98], [99], [100]. Les protéines animales possèdent certaines qualités avantageuses par rapport aux protéines végétales car elles sont généralement plus digestes et plus riches en acides aminés indispensables et contiennent généralement des quantités plus élevées de méthionine [42], [85], [101]. Les farines de poissons et d'insectes sont d'excellentes sources de lysine et d'acides aminés soufrés (méthionine et cystéines), ce qui justifie leur utilisation dans l'amélioration de la valeur biologique des rations alimentaires à base de céréales [102]. Une alimentation faible en protéines animales sera faible en lysine et méthionine [41] mais leur utilisation reste limitée et elles sont généralement plus onéreuses [37], [85]. La fabrication des aliments pour les jeunes poulets et porcs requiert l'incorporation des sources de protéines d'origine animale car ils ont des besoins élevés en AAI pour la croissance. Chez les animaux âgés, les besoins en AAI diminuent et des régimes à faible teneur en protéines animales et des niveaux relativement plus élevés en protéines végétales peuvent satisfaire les besoins [96]. En général, la qualité des sources de protéines animales dépend de la composition de la matière première utilisée. Cependant les sources de protéines animales présentent quelques inconvénients car elles contiennent des lipides riches en acides gras saturés, dits « mauvais gras », renferment du cholestérol et sont économiquement chères [42]. Dans certains pays, leur utilisation dans l'alimentation animale a fait l'objet d'interdiction du fait des germes qu'elles pourraient contenir [49]. Le tableau 2 donne la composition en lysine et en méthionine de quelques ressources alimentaires utilisées dans l'alimentation animale.

Tableau 2. Composition en lysine et en méthionine de quelques ressources alimentaires utilisées dans l'alimentation animale (g/16 gN)

Types de sources	Ingrédients	M.S (%)	PB (%)	Méthionine	Lysine	Sources
Végétales	Maïs	89	9,3	0,25	0,21	[103]
	Sorgho	89,1	10,1	0,2	0,22	
	Mil	87,6	11,7	2,45	2,35	[104]
	Niébé	89,2	24,9	1,52	6,63	
	Tourteau de coton	90	40,3	0,66	1,66	[105]
	Fonio	89,8	7	4,4	2,05	
	Graine de soja		43,6	0,9	2,3	[106]
	Graine de soja décortiqué	96,4	51,8	0,64	2,87	[103]
	Tourteau de soja	89	43,6	0,6	2,8	
	Son blé	86,6	14,6	1,6	3,9	[107]
	Son de maïs	91,5	15,1	1,7	3,7	
	Son de riz	90,2	14,4	2,2	5,5	[108]
	Drêche de brasserie	88,2	24,6	1,7	2,5	
Animales	Farine de poisson	91,8	63,4	2,02	5,29	[103]
	Farine de sang	91,08	89,6	1,16	8,25	
	Larves de mouches domestiques		48,49	3,66	5,1	[102]
	Chenilles		63,7	1,9	6,9	[109]
	Termites		50,35	1,3	5,3	

MS: Matière Sèche; PB: Protéines Brutes

8 LIMITES D'UTILISATION DES PROTÉINES ET DES ACIDES AMINÉS CONTENUS DANS LES ALIMENTS

La digestibilité de l'azote des aliments est dépendante de la nature des matières premières [110]. Les protéines animales possèdent certaines qualités avantageuses par rapport aux protéines végétales car elles sont généralement plus digestes et plus riches en acides aminés indispensables [111]. Les sources végétales sont riches en facteurs antinutritionnels (FAN) dans leurs tissus. Les FAN sont des substances présentes dans les tissus végétaux qui limitent l'absorption des nutriments. Parmi ces FAN on peut citer les tannins et les phytates, mais également des inhibiteurs d'enzymes digestives, altérant la protéolyse pouvant causer l'insuffisance des apports en acides aminés essentiels, notamment en lysine et méthionine [87], [88]. La digestibilité des protéines contenues dans les tissus végétaux est diminuée par les inhibiteurs d'enzymes, les inhibiteurs des amylases et protéases qu'ils contiennent. Chez l'animal de petite taille, ces derniers peuvent entraîner une hypertrophie pancréatique, mais cela n'a pas été prouvé chez l'homme car la cuisson les élimine [111]. En général, les protéines animales sont de meilleure qualité que les protéines végétales. Les rendements de transformation des protéines végétales en protéines animales sont relativement bas. A partir de 100 g de protéines de soja: la vache produit 20 g de protéines de lait, la poule produit 20 g de protéines d'œuf, le porc produit 12 g de protéines de viande, le bœuf produit 4 à 6 g de protéines de viande [112].

9 TECHNOLOGIES D'AMÉLIORATION DES CONCENTRATIONS EN LYSINE ET EN MÉTHIONINE DANS LES INGRÉDIENTS UTILISÉS DANS L'ALIMENTATION DES PORCS ET LA VOLAILLE

La disponibilité des acides aminés ingérés au cours de l'alimentation dépend de nombreux paramètres tels que la conformation de la protéine, la présence de facteurs antinutritionnels, l'association de la protéine avec certains composants (fibres, lipides, métaux), les traitements technologiques (température surtout) et la granulométrie des aliments protéiques ingérées [42]. Dans la pratique, les aliments sont rarement consommés sous leur forme originale. Ils sont soumis à une variété de transformations afin d'améliorer la couleur, la texture et la saveur, de détruire les éventuels pathogènes ou de prévenir la dégradation enzymatique [113], [114]. Les traitements les plus fréquents sont entre autres la pasteurisation [115], la congélation [116], les traitements alcalins [117], la germination de certaines légumineuses, la fermentation des céréales [118] et les traitements thermiques [42]. Les traitements thermiques sont les plus utilisés pour améliorer les propriétés nutritionnelles, hygiéniques, physiques et chimiques et autres propriétés des aliments pour animaux, lesquelles sont connues pour affecter la digestion des protéines [114], [119]. Parmi les traitements thermiques les plus utilisés on peut citer la cuisson, la torrification, l'éclatement, le conditionnement, la granulation et l'extrusion), chacun ayant un objectif différent [119]. Du point de vue nutritionnel, les traitements thermiques peuvent parfois s'avérer bénéfiques et parfois dommageables [41], [118]. Les références [114] et [120] ont montré qu'un traitement thermique sévère peut mener à la destruction d'acides aminés surtout en ce qui concerne la cystéine suivie d'un impact négatif sur la digestibilité des protéines et de la lysine [115], [121], [122]. En plus de ralentir la digestion globale des protéines, l'excès de chaleur semble affecter particulièrement la capacité de certaines enzymes à atteindre leur substrat et ce, de façon variable d'une source alimentaire à l'autre. Plusieurs auteurs [86], [123], [124] ont montré que les traitements thermiques modérés réduisent l'activité des inhibiteurs de la trypsine dans les aliments et influencent positivement la teneur en protéines et en acides aminés essentiels. D'autres procédés tel que la germination qui ne fait pas appel à la chaleur est aussi proposé et appliqué à certaines graines de céréales et de légumineuses destinés aux animaux et aux humains. Cette technologie est considérée par [125], [126] comme étant moins coûteuse et préserve à la fois la structure physique des produits végétaux et leur densité nutritionnelle en fibres, en minéraux, en vitamines, en phytonutriments et en acides aminés indispensables.

10 CONCLUSION

Les acides aminés sont essentiels pour le fonctionnement normal de l'organisme des animaux. Parmi les acides aminés essentiels, la lysine et la méthionine font partis des acides aminés limitants dans le rationnement des porcs et des volailles car un déséquilibre dans les régimes a un impact négatif sur la santé et les performances de croissance des animaux. Ces acides aminés indispensables sont approvisionnés dans les aliments des animaux par diverses sources qui sont d'origine animale et végétale. Ils sont souvent présents en quantité insuffisante dans les aliments destinés aux porcs et aux volailles. Afin d'éviter les carences en lysine et en méthionine dans les rations, les éleveurs font recours aux sources synthétiques et des concentrés sous forme synthétique importé et dont les coûts reviennent chers. La disponibilité des acides aminés indispensables dans les aliments peut être améliorée par la germination des graines ou par les traitements thermiques. Les traitements thermiques présentent des avantages nutritionnels mais diminuent la valeur nutritionnelle des produits végétaux en réduisant drastiquement la densité nutritionnelle des ingrédients. La germination est un procédé plus simple, moins couteux et moins drastique et permet d'améliorer le potentiel nutritionnel des graines en augmentant les teneurs en divers nutriments et composés bioactifs et/ou en augmentant la digestibilité de certains nutriments pour divers types d'aliments. Face à la situation de hausse des coûts des sources de lysine et de méthionine couplés à la qualité douteuse de certaines sources, l'adoption de technologies moins coûteuses et moins drastique d'amélioration de la valeur nutritionnelle et de la digestibilité des ingrédients pourrait être une alternative. A ce titre, la germination des graines pourrait apparaître comme une technologie intéressante dans la résolution des carences des aliments en lysine et en méthionine.

REFERENCES

- [1] J. Meadowcroft, « What about the politics? Sustainable development, transition management, and long-term energy transitions », *Policy Sciences*, vol. 42, n° 4, p. 323-340, 2009.
- [2] T. Bouley, M. Gilbert, P. Y. Whung, F. Le Gall, et C. Plante, « Reducing Climate-Sensitive Disease Risks. Agriculture and Environmental Services Discussion Paper; No. 7 ». Washington, DC, 2014.
- [3] G. Tacher et L. Letenneur, « Le secteur des productions animales en Afrique subsaharienne des indépendances à 2020. III. Prospectives de la demande et de l'offre pour 2020 et voies de réponse au nécessaire développement de l'élevage », *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, vol. 53, n° 4, Art. n° 4, avr. 2000, doi: 10.19182/remvt.9714.
- [4] V. Royer et E. Vidon, « Maison de l'aviculture: Cas de la prise en charge des services par les éleveurs eux-mêmes ». Agridoc, 2001.
- [5] B. Faye et V. Alary, « Stakes of animal production in Southern countries », *Productions Animales (France)*, 2001.

- [6] C. Poulain et P. Mollier, « Troupeaux sous les tropiques. INRA magazine 19, décembre 2011 : 2–4 - Recherche Google », 2011. Consulté le: 15 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.google.com/search?q=Poulain%2C+C>.
- [7] A. Ickowicz et C.-H. Moulin, « Elevage au pâturage et développement durable des territoires méditerranéens et tropicaux: Connaissances récentes sur leurs atouts et faiblesses ». éditions Quae, 2022.
- [8] A. J. Nianogo, R. Sanfo, S. D. Kondombo, et S. B. Neya, « Le point sur les ressources génétiques en matière d'élevage au Burkina Faso », *Animal Genetic Resources/Recursos genéticos animales*, vol. 17, p. 11-28, avr. 1996, doi: 10.1017/S1014233900000559.
- [9] FAO, Le développement durable de l'élevage africain: approche «Une Seule Santé », 2018. Consulté le 15 février 2023. Disponible sur: <https://www.fao.org/3/ca1084fr/ca1084fr.pdf>.
- [10] V. Royer et E. Vidon, « Maison de l'aviculture: Cas de la prise en charge des services par les éleveurs eux-mêmes ». Agridoc, 2001.
- [11] T. Kiendrébéogo, S. Hamadou, L. Y. Mopaté, et C. Y. Kaboré-Zoungrana, « Typologie des élevages porcins urbains et périurbains de Bobo-Dioulasso (Burkina Faso) », *Rev. Afric. Santé Prod. Anim*, vol. 6, p. 3-4, 2008.
- [12] T. Kiendrebeogo, M. L. Youssouf, K. S. Richard, et K.-Z. Chantal-Yvette, « Approvisionnement en porcs vifs et viande porcine de la ville de Bobo-Dioulasso (Burkina Faso) », *Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID)*, vol. 106, n° 2, p. 105-122, 2012.
- [13] J. P. Pradère, « Liens élevage-environnement-développement durable », *Rev. sci. tech. Off. int. Epiz*, vol. 33, n° 3, p. 745-763, 2014.
- [14] S. Pousga, Supplementation strategies for semi-scavenging chickens in Burkina Faso, vol. 2007. 2007.
- [15] B. Ouédraogo, I. B. Gnanda, R. Sanfo, S. J. Zoundi, et B. Bayala, « Étude comparative des performances réalisées avec l'incorporation de la farine de co-produits de volaille et la farine des asticots dans des rations de poulets de chair au burkina faso », *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, vol. 25, p. 148-161, 2015.
- [16] S. Pousga *et al.*, « Effets du remplacement de la farine de poisson par les termites (*Macrotermes* sp.) sur l'évolution pondérale et les caractéristiques de carcasse de la volaille locale au Burkina Faso », *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, vol. 19, n° 2, p. 14354-14371, 2019.
- [17] T. Kiendrébéogo, I. Zangbã, D. Barry, et C. Y. Kaborã, « Production of a Protein Concentrate Based on Maggots of Domestic Flies for the Feeding of Non-ruminant Animals (Burkina Faso) », *Asian Journal of Applied Sciences*, vol. 7, n° 5, 2019a.
- [18] T. Kiendrébéogo, R. O. M. Séré, D. Barry, et C. Y. Kaboré-Zoungrana, « Effects of diets incorporating maggot concentrate on the growth and biometric parameters of layer hens' first eggs in Burkina Faso », *Asian Journal of Natural & Applied Sciences Vol*, vol. 8, p. 1-4, 2019c.
- [19] I. Traoré *et al.*, « Influence des larves séchées de mouches domestiques (*Musca domestica*, L.) sur la prise alimentaire du poulet local (*Gallus domesticus*, L.) au Burkina Faso. », *J. Anim. Plant Sci*, vol. 45, n° 2, p. 7884-7899, 2020.
- [20] I. Z. Ouédraogo, T. Kiendrébéogo, D. X. Millogo, D. P. Sawadogo, H. Koara, et V. M. Bougouma-Yameogo, « Influence de rations incorporant des provendes de mangues et un concentré d'asticots en remplacement au maïs et à la farine de poisson sur les performances de croissance et la qualité des carcasses de poulets de chair poulet de faso », 2022.
- [21] V. M. C. Bougouma-Yaméogo, C. L. Ouédraogo, M. L. Sawadogo, et O. Sawadogo, « Influence du niveau alimentaire du tourteau de coton sur les performances de croissance du poulet de chair: Influence of cotton cake feeding level on the growth performances of broiler chickens », *Sciences Naturelles et Appliquées*, vol. 29, n° 1 et 2, 2007.
- [22] S. Ouattara, V. M. C. Bougouma-Yameogo, A. J. Nianogo, et A. Al Bachir, « Effets des graines torrifiées de *Vigna unguiculata* (niébé) comme source de protéines, dans l'alimentation des poules locales en ponte au Burkina Faso, sur leurs performances zootechniques et la rentabilité économique des régimes », *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 8, n° 5, p. 1990-1999, 2014.
- [23] S. Ouattara, V. M. C. Bougouma-Yaméogo, A. J. Nianogo, et B. Savadogo, « Influence de la substitution des graines de soja (*Glycine max*) par celles de niébé (*Vigna unguiculata*) et du taux de protéines du régime sur les performances des pintadeaux de race locale au Burkina Faso », *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, vol. 69, n° 3, p. 117-123, 2016.
- [24] B. Ouédraogo, S. J. Zoundi, et L. Sawadogo, « Effets de l'incorporation des graines d'oseille de Guinée (*Hibiscus Sabdariffa*, L.) bouillies dans les rations sur les performances de croissance des poulets de chair au Burkina Faso », *Afrique SCIENCE*, vol. 18, n° 2, p. 42-55, 2021.
- [25] B. Ouédraogo, H. Kabore, S. Pousga, et S. J. Zoundi, « Effet de l'incorporation de la farine de graines bouillies d'*Acacia macrostachya* (Reichenb. ex. DC.) dans l'alimentation sur les performances de croissance des poulets de chair au Burkina Faso », 2022a.
- [26] J. L. Michel, L. C. Madoff, K. Olson, D. E. Kling, D. L. Kasper, et F. M. Ausubel, « Large, identical, tandem repeating units in the C protein alpha antigen gene, bca, of group B streptococci. », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 89, n° 21, p. 10060-10064, 1992.
- [27] J. Yin *et al.*, « Long-term effects of lysine concentration on growth performance, intestinal microbiome, and metabolic profiles in a pig model », *Food & function*, vol. 9, n° 8, p. 4153-4163, 2018.
- [28] B. Leclercq, Y. Henry, et F. Lebas, « Evolution de la nutrition des espèces monogastriques », *Productions animales*, p. 85-94, 1996.

- [29] I. national de la recherche agronomique (France), *L'alimentation des animaux monogastriques: porc, lapin, volailles*. Editions Quae, 1989.
- [30] N. R. C. (US) N. C. on S. E. Standards et Assessment, *National Science Education Standards: Draft for Review and Comment Only*. National Research Council, 1994.
- [31] C. Berri *et al.*, « Optimiser le ph ultime des filets de poulet en modulant le profil en acides aminés de l'aliment en fin d'élevage », *hors-série*, 2012.
- [32] J. D. Firman, « Nutrient requirements of chickens & turkeys », *Nutrient requirements of chickens & turkeys*, vol. 2101, n° DC 20418, p. G8352-G8352, 1989.
- [33] O. C. Hien, I. Salissou, A. Ouédraogo, L. Ouattara, B. Diarra, et J. D. Hancock, « Effets comparés de rations à base des variétés de maïs «ESPOIR» et de maïs «SR21» sur la productivité du poulet de chair de souche cobb-500 », *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 12, n° 4, p. 1557-1570, 2018.
- [34] D. Barry, T. Kiendrebeogo, M. Sere, A. Combari, Y. M. Logténé, et C. Y. Kaboré-Zoungrana, « Effects of Mango Wastes-Based Diets on the Growing Parameters of Laying Hens and Biometric Parameters of the Eggs », *OALib*, vol. 06, n° 11, p. 1-13, 2019, doi: 10.4236/oalib.1105868.
- [35] « Umutoni C : 2012. Évaluation technicoéconomique des élevages de porcs à Bobo-Dioulasso (Burkina Faso). Mémoire de Master en Production Animale et Développement Durable. École Inter-états des Sciences et et Médecine Vétérinaires (EISMV) de Dakar. » Recherche Google. <https://www.google.com/search?q=Umutoni+C+%3A+2012>. 32p.
- [36] C. Bouget, « Protéines et acides aminés: utilisations par les sportifs et conseils à l'officine », 2020.
- [37] M. Gloaguen, N. Le Floc'H, et J. Van Milgen, « Couverture des besoins en acides aminés chez le porcelet alimenté avec des régimes à basse teneur en protéines », *INRA Prod. Anim.*, vol. 26, n° 3, p. 277-288, juin 2013, doi: 10.20870/productions-animales.2013.26.3.3157.
- [38] P. Patureau mirand, « Les apports nutritionnels conseillés (ANC) en protéines », *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, vol. 10, n° 1, p. 61-65, 2003.
- [39] J. van Milgen et J.-Y. Dourmad, « Concept and application of ideal protein for pigs », *Journal of Animal Science and Biotechnology*, vol. 6, n° 1, p. 1-11, 2015.
- [40] E. De Gavelle, « Modélisation de trajectoires acceptables de réarrangement de la consommation de sources protéiques pour augmenter l'adéquation nutritionnelle et impacts sur la durabilité », These de doctorat, Université Paris-Saclay (ComUE), 2019. Consulté le: 10 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2019SACLA016>.
- [41] F. Mariotti, « Plant protein, animal protein, and protein quality », in *Vegetarian and plant-based diets in health and disease prevention*, Elsevier, 2017, p. 621-642.
- [42] J.-L. Cuq, « Les protéines végétales alternatives aux protéines animales. Comment accroître leur niveau de qualité ? », 2018.
- [43] D. Tomé, « Besoins en protéines et en acides aminés & qualité des protéines alimentaires », *Crit Rev Food Sci Nutr*, vol. 48, n° 177, 2008.
- [44] F. W. Sosulski et G. I. Imafidon, « Amino acid composition and nitrogen-to-protein conversion factors for animal and plant foods », *J. Agric. Food Chem.*, vol. 38, n° 6, p. 1351-1356, juin 1990, doi: 10.1021/jf00096a011.
- [45] S. C. B. Pomalégny, Synthèse bibliographique sur les insectes et autres invertébrés comestibles utilisés dans l'alimentation des animaux monogastriques d'élevage SCB, 2016.
- [46] Y. Henry, « Affinement du concept de la protéine idéale pour le porc en croissance », *INRAE Productions Animales*, vol. 6, n° 3, p. 199-212, 1993.
- [47] B. Leclercq, « Les rejets azotés issus de l'aviculture : importance et progrès envisageables », *INRA Prod. Anim.*, vol. 9, n° 2, p. 91-101, avr. 1996, doi: 10.20870/productions-animales.1996.9.2.4038.
- [48] D. Soltner, *Alimentation Des Animaux Domestiques*, 21^{ème} Edition. Paris, 1999. Consulté le: 13 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.vetbookstore.com/2021/08/alimentation-des-animaux-domestiques.html>.
- [49] S. S. M. Beski, R. A. Swick, et P. A. Iji, « Specialized protein products in broiler chicken nutrition: A review », *Animal Nutrition*, vol. 1, n° 2, p. 47-53, juin 2015, doi: 10.1016/j.aninu.2015.05.005.
- [50] S. Tesseraud, « Métabolisme protéique chez le poulet en croissance. Effet des protéines alimentaires », *Productions animales*, vol. 8, n° 3, p. 197-212, 1995.
- [51] J. Y. Dourmad et M. Etienne, « Dietary lysine and threonine requirements of the pregnant sow estimated by nitrogen balance », *Journal of animal science*, vol. 80, n° 8, p. 2144-2150, 2002.
- [52] D. Rinaldo et J. Le Dividich, « Influence de la température ambiante sur les performances de croissance du porc », *Productions animales*, vol. 4, n° 1, p. 57-65, 1991.
- [53] J. M. Heo, J. C. Kim, C. F. Hansen, B. P. Mullan, D. J. Hampson, et J. R. Pluske, « Feeding a diet with decreased protein content reduces indices of protein fermentation and the incidence of postweaning diarrhea in weaned pigs challenged with an

- enterotoxigenic strain of *Escherichia coli*», *Journal of Animal Science*, vol. 87, n° 9, p. 2833-2843, sept. 2009, doi: 10.2527/jas.2008-1274.
- [54] P. Frayssé et M. Lessire, « Effet de la réduction de la teneur en protéines des aliments de poulets de chair: approche par méta-analyse », 2015.
- [55] M. Gloaguen, N. Le Floc'h, E. Corrent, Y. Primot, et J. Van Milgen, « The use of free amino acids allows formulating very low crude protein diets for piglets », *Journal of animal science*, vol. 92, n° 2, p. 637-644, 2014.
- [56] J. P. Holsheimer et W. M. M. A. Janssen, « Limiting amino acids in low protein maize-soyabean meal diets fed to broiler chicks from 3 to 7 weeks of age », *British Poultry Science*, vol. 32, n° 1, p. 151-158, mars 1991, doi: 10.1080/00071669108417336.
- [57] E. T. Moran Jr, R. D. Bushong, et S. F. Bilgili, « Reducing dietary crude protein for broilers while satisfying amino acid requirements by least-cost formulation: live performance, litter composition, and yield of fast-food carcass cuts at six weeks », *Poultry Science*, vol. 71, n° 10, p. 1687-1694, 1992.
- [58] M. Jobling, « National Research Council (NRC): Nutrient requirements of fish and shrimp », *Aquacult Int*, vol. 20, n° 3, p. 601-602, juin 2012, doi: 10.1007/s10499-011-9480-6.
- [59] Z. Yang, J. K. Htoo, et S. F. Liao, « Methionine nutrition in swine and related monogastric animals: Beyond protein biosynthesis », *Animal Feed Science and Technology*, vol. 268, p. 114608, 2020.
- [60] S. Tesseraud, R. Peresson, J. Lopes, et A. M. Chagneau, « Dietary lysine deficiency greatly affects muscle and liver protein turnover in growing chickens », *British Journal of Nutrition*, vol. 75, n° 6, p. 853-865, 1996.
- [61] J. Nasr et F. Kheiri, « Effect of different lysine levels on Arian broiler performances », *Italian Journal of Animal Science*, vol. 10, n° 3, p. e32, 2011.
- [62] S. F. Liao, T. Wang, et N. Regmi, « Lysine nutrition in swine and the related monogastric animals: muscle protein biosynthesis and beyond », *SpringerPlus*, vol. 4, n° 1, p. 1-12, 2015.
- [63] D. N. Salter, A. I. Montgomery, A. Hudson, D. B. Quelch, et R. J. Elliott, « Lysine requirements and whole-body protein turnover in growing pigs », *British Journal of Nutrition*, vol. 63, n° 3, p. 503-513, mai 1990, doi: 10.1079/BJN19900137.
- [64] S. Tesseraud, M. Larbier, A. Chagneau, et P. Geraert, « Effect of dietary lysine on muscle protein turnover in growing chickens », *Reprod. Nutr. Dev.*, vol. 32, n° 2, p. 163-175, 1992, doi: 10.1051/rnd: 19920209.
- [65] K. Hiramoto, T. Muramatsu, et J. Okumura, « Effect of Methionine and Lysine Deficiencies on Protein Synthesis in the Liver and Oviduct and in the Whole Body of Laying Hens1 », *Poultry Science*, vol. 69, n° 1, p. 84-89, janv. 1990, doi: 10.3382/ps.0690084.
- [66] NRC, « Nutrient requirements of poultry ninth revised edition National Academy Press », *Washington DC*, vol. 10, p. 2114, 1994.
- [67] Z. Yang, J. K. Htoo, et S. F. Liao, « Methionine nutrition in swine and related monogastric animals: Beyond protein biosynthesis », *Animal Feed Science and Technology*, vol. 268, p. 114608, oct. 2020, doi: 10.1016/j.anifeeds.2020.114608.
- [68] J. D. Finkelstein, « Methionine metabolism in mammals », *The Journal of nutritional biochemistry*, vol. 1, n° 5, p. 228-237, 1990.
- [69] J. Jankowski, M. Kubińska, et Z. Zduńczyk, « Nutritional and immunomodulatory function of methionine in poultry diets – a review », *Annals of Animal Science*, vol. 14, n° 1, p. 17-32, mars 2014, doi: 10.2478/aoas-2013-0081.
- [70] T. K. Chung et D. H. Baker, « Utilization of methionine isomers and analogs by the pig », *Can. J. Anim. Sci.*, vol. 72, n° 1, p. 185-188, mars 1992, doi: 10.4141/cjas92-024.
- [71] W. Zhai *et al.*, « Protein expression in pectoral skeletal muscle of chickens as influenced by dietary methionine », *Poultry Science*, vol. 91, n° 10, p. 2548-2555, 2012.
- [72] C. Wen *et al.*, « Methionine improves breast muscle growth and alters myogenic gene expression in broilers », *Journal of Animal Science*, vol. 92, n° 3, p. 1068-1073, mars 2014, doi: 10.2527/jas.2013-6485.
- [73] R. Ma *et al.*, « Comparative study on the effects of L-methionine or 2-hydroxy-4- (methylthio) butanoic acid as dietary methionine source on growth performance and anti-oxidative responses of turbot (*Psetta maxima*) », *Aquaculture*, vol. 412-413, p. 136-143, nov. 2013, doi: 10.1016/j.aquaculture.2013.07.021.
- [74] M. Ahmed et T. Abbas, « Effects of Dietary Levels of Methionine on Broiler Performance and Carcass Characteristics », *International Journal of Poultry Science*, vol. 10, févr. 2011, doi: 10.3923/ijps.2011.147.151.
- [75] M. Bouyeh et O. K. Gevorgyan, « Influence of excess lysine and methionine on cholesterol, fat and performance of broiler chicks », *J. Anim. Vet. Adv.*, vol. 10, n° 12, p. 1546-1550, 2011.
- [76] J. A. Conde-Aguilera, L. Lefaucheur, S. Tesseraud, Y. Mercier, N. Le Floc'h, et J. van Milgen, « Skeletal muscles respond differently when piglets are offered a diet 30 % deficient in total sulfur amino acid for 10 days », *Eur J Nutr*, vol. 55, n° 1, p. 117-126, févr. 2016, doi: 10.1007/s00394-014-0830-9.
- [77] S. Toue, R. Kodama, M. Amao, Y. Kawamata, T. Kimura, et R. Sakai, « Screening of toxicity biomarkers for methionine excess in rats », *The Journal of nutrition*, vol. 136, n° 6, p. 1716S-1721S, 2006.
- [78] A. Matsuzaki *et al.*, « US3 protein kinase of herpes simplex virus type 2 is required for the stability of the UL46-encoded tegument protein and its association with virus particles », *Journal of General Virology*, vol. 86, n° 7, p. 1979-1985, 2005, doi: 10.1099/vir.0.80949-0.

- [79] T. A. M. Fomekong, J. R. Kana, T. R. Ngouana, K. H. Mube, et A. Tegua, « Effets du taux de la lysine et de la méthionine de la ration sur les performances de croissance de la poule Barrée du Cameroun », *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 12, n° 2, p. 927-939, 2018.
- [80] J. T. Skinner, A. L. Waldroup, et P. W. Waldroup, « Effects of Dietary Amino Acid Level and Duration of Finisher Period on Performance and Carcass Content of Broilers Forty-Nine Days of Age1 », *Poultry Science*, vol. 71, n° 7, p. 1207-1214, juill. 1992, doi: 10.3382/ps.0711207.
- [81] C. G. Scanes, G. Brant, et M. E. Ensminger, « Poultry Science. 4th edn Pearson Education », *Upper Saddle River, New Jersey*, 2004.
- [82] M.-C. Baraut, *RECOMMANDATIONS NUTRITIONNELLES POUR LA POPULATION - RNP -*. MED-LINE, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.med-line.fr/back-future-fine/uploads/2019/11/Extrait-Recommandations-nutritionnelles-pour-la-population-RNP-MC-Baraut.pdf>
- [83] S. M. Tielemans *et al.*, « Intake of total protein, plant protein and animal protein in relation to blood pressure: a meta-analysis of observational and intervention studies », *Journal of human hypertension*, vol. 27, n° 9, p. 564-571, 2013.
- [84] J. H. Denton, C. N. Coon, J. E. Pettigrew, et C. M. Parsons, « Historical and scientific perspectives of same species feeding of animal by-products », *Journal of applied poultry research*, vol. 14, n° 2, p. 352-361, 2005.
- [85] M. Van Winkel, S. Vande Velde, R. De Bruyne, et S. Van Biervliet, « Clinical practice: vegetarian infant and child nutrition », *European journal of pediatrics*, vol. 170, p. 1489-1494, 2011.
- [86] G. O. Adeyemo et O. G. Longe, « Effects of graded levels of cottonseed cake on performance, haematological and carcass characteristics of broilers fed from day old to 8 weeks of age », *African Journal of Biotechnology*, vol. 6, n° 8, 2007.
- [87] J. A. Schmidt *et al.*, « Plasma concentrations and intakes of amino acids in male meat-eaters, fish-eaters, vegetarians and vegans: a cross-sectional analysis in the EPIC-Oxford cohort », *European journal of clinical nutrition*, vol. 70, n° 3, p. 306-312, 2016.
- [88] C. Agnoli *et al.*, « Position paper on vegetarian diets from the working group of the Italian Society of Human Nutrition », *Nutrition, metabolism and cardiovascular diseases*, vol. 27, n° 12, p. 1037-1052, 2017.
- [89] G. K. Davey, E. A. Spencer, P. N. Appleby, N. E. Allen, K. H. Knox, et T. J. Key, « EPIC-Oxford: lifestyle characteristics and nutrient intakes in a cohort of 33 883 meat-eaters and 31 546 non meat-eaters in the UK », *Public health nutrition*, vol. 6, n° 3, p. 259-268, 2003.
- [90] A. Waldmann, J. W. Koschizke, C. Leitzmann, et A. Hahn, « Dietary intakes and lifestyle factors of a vegan population in Germany: results from the German Vegan Study », *European journal of clinical nutrition*, vol. 57, n° 8, p. 947-955, 2003.
- [91] N. B. Kristensen *et al.*, « Intake of macro-and micronutrients in Danish vegans », *Nutrition journal*, vol. 14, p. 1-10, 2015.
- [92] S. Schiltz, N. Munier-Jolain, C. Jeudy, J. Burstin, et C. Salon, « Dynamics of exogenous nitrogen partitioning and nitrogen remobilization from vegetative organs in pea revealed by 15N in vivo labeling throughout seed filling », *Plant Physiology*, vol. 137, n° 4, p. 1463-1473, 2005.
- [93] K. Gallardo, C. L. Signor, G. Duc, R. Thompson, et J. Burstin, « Quels leviers génétiques mobilisables afin d'améliorer l'équilibre en acides aminés des graines de légumineuses? », *Innovations Agronomiques*, vol. 60, p. 43, 2017, doi: 10.15454/1.5138508996277556E12.
- [94] C. Calet, « Les légumes secs, apport protidique », *Cahiers de nutrition et de diététique*, vol. 27, n° 2, p. 99-108, 1992.
- [95] D. B. Haytowitz et P. R. Pehrsson, « USDA's National Food and Nutrient Analysis Program (NFNAP) produces high-quality data for USDA food composition databases: Two decades of collaboration », *Food Chemistry*, vol. 238, p. 134-138, janv. 2018, doi: 10.1016/j.foodchem.2016.11.082.
- [96] V. Ravindran, « Poultry feed availability and nutrition in developing countries », *Poultry development review*, vol. 2, p. 60-63, 2013.
- [97] D. Bastianelli et C. Le Bas, « Evaluation du rôle de l'alimentation animale dans la sécurité des aliments: Perspectives d'action », *Actes de l'atelier international, CIRAD-FAO, Montpellier, France*, 2002.
- [98] J. Hardouin, « Production d'insectes à des fins économiques ou alimentaires: Mini-élevage et BEDIM », *Notes fauniques de Gembloux*, vol. 50, p. 15-25, 2003.
- [99] K. C. Klasing, « Poultry nutrition: a comparative approach », *Journal of Applied Poultry Research*, vol. 14, n° 2, p. 426-436, 2005.
- [100] G. Wu, F. W. Bazer, et H. R. Cross, « Land-based production of animal protein: impacts, efficiency, and sustainability », *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1328, n° 1, p. 18-28, 2014.
- [101] S. H. Gorissen *et al.*, « Protein content and amino acid composition of commercially available plant-based protein isolates », *Amino acids*, vol. 50, p. 1685-1695, 2018.
- [102] B. A. Rumpold et O. K. Schlüter, « Nutritional composition and safety aspects of edible insects », *Molecular nutrition & food research*, vol. 57, n° 5, p. 802-823, 2013.
- [103] P. Li, W. He, et G. Wu, « Composition of amino acids in foodstuffs for humans and animals », *Amino acids in nutrition and health: amino acids in gene expression, metabolic regulation, and exercising performance*, p. 189-210, 2021.

- [104] J. C. Maliboungou, M. Lessire, et J. M. Hallouis, « Composition chimique et teneur en énergie métabolisable des matières premières produites en République centrafricaine et utilisables chez les volailles », *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, vol. 51, n° 1, p. 55-61, 1998.
- [105] R. S. Vodouhe, G. A. Dako, A. Dansi, et H. Adoukonou-Sagbadja, « Fonio: a treasure for West Africa », *Plant genetic resources and food security in West and Central Africa. Ibadan, Nigeria*, p. 219-222, 2007.
- [106] C. Botella, « Les protéines végétales : intérêts et limites. Sciences pharmaceutiques. 2021. dumas03210847 - Recherche Google », 2021. <https://www.google.com/search?q=Claire+Botella>. (consulté le 13 février 2023).
- [107] N. Richter, P. Siddhuraju, et K. Becker, « Evaluation of nutritional quality of moringa (*Moringa oleifera* Lam.) leaves as an alternative protein source for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) », *Aquaculture*, vol. 217, n° 1-4, p. 599-611, 2003.
- [108] D. Sauvant, J.-M. Perez, et G. Tran, « Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage: porcs, volailles, bovines, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons », *INRA Editions, Versailles*, 2002.
- [109] G. P. Maurizio, « Ecological implications of minilivestock; role of rodents, frogs, snails, and insects for sustainable development. Science Publishers, Inc. ISBN 1-57808-339-7. - Recherche Google », 2005. <https://www.google.com/search?q=Maurizio+G.+P.%2C+2005>. (consulté le 13 février 2023).
- [110] M. J. Paul, L. Philippe, B. Denis, B. Isabelle, F. Yann, et V. Maria, « Facteurs de variation de la digestibilité des nutriments chez le poulet : synthèse des résultats du projet DIGSPIR. », 2015.
- [111] J.-M. Lecerf, « Le génie des légumineuses », *Pratiques en Nutrition: santé et alimentation*, vol. 12, p. 36-39, 2016.
- [112] E. N. Whitney et S. R. Rolfes, *Understanding Nutrition, eighth ed. Wadsworth Publishing Company, Belmont, USA, pp. 3-40. - Recherche Google*, 11 th edition. © 2008, 2005 Thomson Wadsworth, a part of The Thomson Corporation., 1999. Consulté le: 26 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.google.com/search?q=Whitney%2C+E.N>.
- [113] F. Shahidi et C.-T. Ho, « Process-Induced Chemical Changes in Foods: An Overview », *Process-Induced Chemical Changes in Food*, p. 1-3, 1998.
- [114] M. D'Amours, Impact de la chaleur et des lipides sur la digestion protéique de divers aliments. Université Laval, 2001.
- [115] S. Rudloff et B. Lönnerdal, « Solubility and digestibility of milk proteins in infant formulas exposed to different heat treatments », *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, vol. 15, n° 1, p. 25-33, 1992.
- [116] A. M. Castrillón, E. Alvarez-Pontes, M. T. G. Arias, et P. Navarro, « Influence of Frozen Storage and Defrosting on the Chemical and Nutritional Quality of Sardine (*Clupea pilchardus*) », *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 70, n° 1, p. 29-34, 1996.
- [117] M. Friedman, « Formation, nutritional value, and safety of D-amino acids », *Nutritional and toxicological consequences of food processing*, p. 447-481, 1991.
- [118] R. E. Öste, « Digestibility of processed food protein », *Nutritional and toxicological consequences of food processing*, p. 371-388, 1991.
- [119] J. Levic et S. Sredanovic, « Heat treatments in animal feed processing. », in 2nd Workshop Feed-to-Food FP7 REGPOT-3. Extrusion technology in feed and food processing, Thematic Proceedings. Novi Sad, Serbia, 19-21 October, 2010, Institute for Food Technology, 2010, p. 1-24.
- [120] M. Eklund *et al.*, « Effect of processing of rapeseed under defined conditions in a pilot plant on chemical composition and standardized ileal amino acid digestibility in rapeseed meal for pigs », *Journal of animal science*, vol. 93, n° 6, p. 2813-2825, 2015.
- [121] L. Michel, « Digestibilité des acides aminés dans les matières premières alimentaires chez le poulet: méthodologie de mesure, facteurs de variation et conséquences pour la formulation », PhD Thesis, Rennes 1, 1992.
- [122] G. S. Gilani, K. A. Cockell, et E. Sepehr, « Effects of antinutritional factors on protein digestibility and amino acid availability in foods », *Journal of AOAC international*, vol. 88, n° 3, p. 967-987, 2005.
- [123] M. M. Rabiou *et al.*, « Composition en acides aminés des graines de *Boschia senegalensis* issues de différentes méthodes de traitements traditionnelles au Niger », *European Scientific Journal*, vol. 15, n° 6, p. 1857-7881, 2019.
- [124] J. Boye, R. Wijesinha-Bettoni, et B. Burlingame, « Protein quality evaluation twenty years after the introduction of the protein digestibility corrected amino acid score method », *British Journal of Nutrition*, vol. 108, n° S2, p. S183-S211, 2012.
- [125] A. Fardet, Optimiser le potentiel santé des produits végétaux par des technologies douces : sucres lents, préhydrolyse, germination et préfermentation. 2014.
- [126] F. Hübner et E. K. Arendt, « Germination of Cereal Grains as a Way to Improve the Nutritional Value: A Review », *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 53, n° 8, p. 853-861, janv. 2013, doi: 10.1080/10408398.2011.562060.