

UNIVERSITÉ FRANÇOIS – RABELAIS DE TOURS

ÉCOLE DOCTORALE SSBCV
ÉQUIPE Dynamiques Nutritionnelles

THÈSE présentée par :

Dolores I. BATONON

Soutenue le : 05 décembre 2014

Pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université François – Rabelais de Tours**

Discipline/ Spécialité : Sciences de la vie

Systèmes d'alimentation alternatifs pour le développement des filières volailles en régions chaudes

THÈSE dirigée par :

M. LESCOAT Philippe

Professeur, AgroParisTech, Paris

Co-encadrée par :

M. BASTIANELLI Denis

Chercheur, CIRAD, Montpellier

M. CHRYSOSTOME Christophe

Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi, FSA, Bénin

RAPPORTEURS :

M. BECKERS Yves

Professeur, Université de Liège, Gembloux

M. GRONGNET Jean-François

Professeur, Agrocampus ouest, Rennes

JURY :

Mme NARCY Agnès

Ingénieur de recherches, INRA-URA, Nouzilly

M. BOUTONNET Jean-Pierre

Chargé de recherches, Montpellier Supagro

M. BECKERS Yves

Professeur, Université de Liège, Gembloux

M. GRONGNET Jean-François

Professeur, Agrocampus ouest, Rennes

Mme DUITTOZ Anne

Professeur, Université François Rabelais, Tours

M. CHRYSOSTOME Christophe

Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi, FSA, Bénin

M. LESCOAT Philippe

Professeur, AgroParisTech, Paris

M. BASTIANELLI Denis

Chercheur, CIRAD, Montpellier

A ma mère Blandine WADOCHEDOHOUN

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du jury en qualité de rapporteurs et d'examineurs.

J'exprime ma profonde reconnaissance aux partenaires financiers sans qui ce projet n'aurait pas abouti. J'ai beaucoup bougé pendant ma thèse et ils sont nombreux ! L'ambassade de France au Bénin via son Service de Coopération et d'Action Culturelle (SCAC) et le Département INRA PHASE ; l'UNESP de Jaboticabal, le projet CAPES-COFECUB et l'Université François Rabelais pour mon séjour et mon expérimentation au Brésil. Je remercie également DSM Nutritional Products pour le financement des travaux '*poulet*'. Enfin, je voudrais témoigner toute ma gratitude à Philippe et Elisabeth Lescoat pour toute l'aide financière qu'ils m'ont apportée durant ces 4 dernières années.

Je remercie mon directeur de thèse Philippe Lescoat. Merci encore pour l'engagement et la détermination qui ont permis de concrétiser cette thèse. Merci de m'avoir soutenue ces 4 dernières années et merci de continuer à le faire. Je repars avec ta phrase fétiche en tête : « *C'est pas grave ! Tu vas voir, c'est même très simple à régler !* » qui sera je pense celle qui me fera relativiser à chaque fois, recommencer avec sourire et « *take it easy !* ».

Je remercie mes co-directeurs de thèse : Christophe Chrysostome et Denis Bastianelli qui a rejoint l'aventure en cours de route. Merci à Denis pour la confiance qu'il m'a apportée depuis mon M2, pour la liberté de réflexion, tous les échanges enrichissants qui m'ont conduit à l'accomplissement de ce projet et pour sa grande attention aux détails. A ses côtés, j'ai appris à présenter un essai "*comme si je racontais une histoire à des amis dans un bar*" (Smile !) à ses côtés. Merci à Christophe pour ces échanges constructifs et pour avoir été le premier à m'initier à la zootechnie.

Merci à Nilva K. Sakomura qui m'a accueillie dans son labo et pour toutes les connaissances acquises à Jaboticabal « *Oi Profa. ! Muito obrigada para tudo. Foi prazer encontrar você ! Gostei trabalhar com você e espero que a gente vai combinar de novo para o avanço da ciência nos trópicos* ». Merci à Murtala Umar Faruk et Gilbert Weber pour la confiance qu'ils m'ont accordée. J'ai eu l'occasion de faire mes premiers pas en entreprise privée grâce à vous et ce n'est que le début d'une longue aventure dans la recherche privée. Merci à toute l'équipe volaille du CRNA : Sabrina, Anne, Angeline, Charline, Raffaella, Pauline, Didier et tous les autres pour la bonne ambiance lors de mon séjour. Merci également à Fidelis Fru (*Hey boss !*) pour m'avoir accueillie au CRNA et pour tous les échanges enrichissants.

Merci à Lucile Montagne et Laurence Lamothe pour leurs conseils lors de mon comité de thèse. Merci à Guillaume Duteurtre pour son aide et ses conseils avisés pour l'étude filière. Grâce à lui, j'ai appris à voir les choses autrement que sous l'angle de la nutrition.

Je suis particulièrement redevable à Yves Nys qui a participé à mon déplacement au Brésil en 2012 pour le congrès mondial. Merci également pour toutes les discussions sur la physiologie

de la ponte chez la poule et pour m'avoir soutenue pendant ces 3 années. Merci à mon mentor et amie, Virginie Rivera pour m'avoir soutenue ces derniers mois et aidé à croire en moi. Merci à Isabelle Bouvarel avec qui j'ai fait mes premiers pas dans la recherche pendant mon stage de M2 et pour son soutien ces derniers mois.

Merci à Maxime Traineau pour tous les échanges fructueux et échanges de mangeoires lors de l'expérience « chaleur ». J'ai pris du plaisir à travailler avec toi et j'espère qu'on aura l'occasion de recommencer. Remarque ! On s'est déjà donné rdv dans quelques années pour créer notre entreprise (Smile !). Je n'oublie pas les soirées « wii » et « football » qui m'ont permis de décompresser avant ton départ pour le pays du soleil de minuit.

Merci aux membres de l'équipe DN de l'URA : Agnès Narcy pour toutes les fois où j'ai sollicité son aide pour des questions « biologiques », Bertrand Méda pour ses contributions (via facebook et en direct), Michel Couty avec qui on a fait du « séquentiel » pour l'Expé « Chaleur », Pauline Fraysse-Bebel (ou Bebel ?! - ;) je te passe le flambeau), Marion Bournazel (don't give up ! tu arriveras à maîtriser R !), Léonie Dusart, Jean-Marc Hallouis, Michel Lessire, Irène Gabriel, Maryse Leconte, Nathalie Même, Emilie Recoules. Les filles de l'ITAVI : Laure, Angélique, Marie, Amandine. Merci à Xavière Rousseau pour les moments passés au Brésil. Merci également à Michel Duclos pour m'avoir accueillie à l'URA et l'ensemble du personnel de l'unité pour l'aide qu'ils m'ont apportée tout au long de cette thèse.

Merci à tous mes copains du Brésil : Hilda, Michele, Pomba, Nayara, Daniella, Melina, Camilla"s", Myrielle, Alan, Edney, Kakareco, Gabriel, *obrigada por todo os momentos que nós temos passado. Eu gostei aprender português mas já estou esquecendo ! Até mais meus amigos*. Merci à Kris et Vitor qui ont été là pour moi pendant ces 4 mois au Brésil (*Love u guys !!*).

Merci à mes amis qui ont veillé sur moi et m'ont soutenu tout le long de cette aventure : Lorel, Symphorien, Houda et Béa (j'ai adoré vous rencontrer et merci encore pour les moments de délires qui nous ont aidé à tenir !), Juliette (pour avoir veillé sur moi à sa manière ces derniers mois et pour avoir participé 'activement' à la thèse via l'impression et la livraison d'articles à domicile), Justine (pour mes premiers pas de Kiz'), Viviane, Djib, Maeva.

J'exprime toute ma gratitude à ma famille dont l'amour et le soutien sont une source intarissable d'inspiration et de réconfort : ma mère, mon oncle Erick, ma petite sœur adorée (Fèmi je compte sur toi pour exceller dans le domaine qui sera le tien), mon grand-père, Lio (mon *speed dial* qui a toujours su me motiver et m'aider à aller de l'avant), mon parrain 'Jbs', Abel (pour les coups de fil réguliers de soutien) et toute la famille Wadochedohoun. Et merci à Octavio pour sa présence et son soutien, sa patience face à mes longues heures de travail, sa compréhension lors des stages à l'étranger et pendant la période de rédaction où le stress a été au rdv et où je n'ai pas toujours été « connectée ».

Résumé

Une étude d'une filière tropicale de production d'œufs a été réalisée afin d'identifier les enjeux de la production avicole et a permis de mieux comprendre l'organisation et le fonctionnement de la filière. Des entretiens semi-dirigés ont été réalisés auprès des éleveurs de poules pondeuses et des acteurs de l'amont, de l'aval et des structures d'appui et de régulation de la filière. À l'issue de cette série d'enquêtes, deux interrogations relatives à la valorisation des matières premières et à l'applicabilité de systèmes d'alimentation innovants (alimentation séquentielle et mélangée) ont motivé les études de cette thèse. L'objectif de ce travail était d'évaluer, les possibilités de diversification des matières premières utilisées en alimentation de la volaille et les conditions d'application des systèmes d'alimentation séquentielle et mélangée en milieu chaud.

Une méta-analyse a été réalisée pour étudier la réponse du poulet de chair à l'incorporation dans l'aliment de matières premières alternatives : millet, sorgho et tourteau de coton. Les résultats ont permis de mettre en évidence l'impact de ces matières premières sur les performances de production. Ces résultats ont été confirmés par des essais *in vivo*. Ces essais ont mis en évidence une absence d'interaction entre ces matières premières et ont permis de conclure qu'il est possible de combiner sorgho et tourteau de coton, sorgho et millet dans l'aliment du poulet sans effet synergique sur les performances.

Chez la poule pondeuse, une étude réalisée au Brésil a montré que lorsque l'animal est soumis à des conditions thermiques et hygrométriques changeantes, les performances de production des poules en alimentation séquentielle et mélangée sont fortement affectées contrairement aux poules en alimentation classique. Une seconde étude réalisée en station expérimentale en France a mis en évidence qu'en condition thermique chaude mais constante, les poules en alimentation séquentielle avaient une meilleure efficacité alimentaire que les poules en alimentation classique. L'alimentation séquentielle n'est donc pas inadaptée en température chaude maintenue constante.

Ce travail a permis de mieux comprendre les interactions entre matières premières alternatives et d'évaluer les limites de l'alimentation séquentielle et mélangée en milieu chaud. Des systèmes d'alimentation dans lesquels les matières premières produites dans les pays chauds pouvaient être valorisées directement ont été proposés, permettant ainsi de renforcer les liens entre filière avicole et filière végétale et de contribuer à leur développement.

Mots-clés : volaille, tropical, systèmes d'alimentation, matières premières

Résumé en anglais

A study of a tropical egg value chain was performed to identify the main challenges faced by the stakeholders in poultry production and to better understand the dynamic of structuration of the value chain. Semi-structured interviews were conducted with eggs producers and stakeholders involved in the whole value chain. This study highlighted two questions relative to i) the utilization of locally available feed ingredients and ii) the application of innovative feeding systems (sequential and loose-mix feeding) to improve the production in hot climates. Therefore, the objective of this work was to evaluate the impact of alternative feed ingredients in poultry feeding and to determine bird's responses to sequential and loose-mix feeding in hot climate.

A meta-analysis was performed to investigate the response of broilers to utilization of millet, sorghum and cottonseed meal. Results showed that millet-based diets resulted in similar performance as the corn-based ones while sorghum and cottonseed meal affected bird performance. No major dose-response effect was observed. These results were confirmed by an additional work realized *in vivo*. The experimental results showed a lack of interaction between these feed ingredients and highlighted the possibility to combine sorghum and cottonseed meal, sorghum and millet in broiler diet without any synergistic effect on performance.

In laying hens, a study conducted in Brazil showed that when they are subjected to variable temperature and humidity throughout and within a day, laying and growth performance decreased in sequential and loose-mix feeding compared to continuous feeding system. A second study conducted in experimental station in France confirmed that hens fed sequentially showed better efficiency than those in complete feeding. Therefore, constant high environmental temperature does not disable sequential feeding benefits.

This thesis helped to better understand the interaction between feed ingredients. It also allowed evaluating the limits of sequential and loose-mixed feeding under high temperatures. Feeding systems in which feed ingredients produced in hot climates could be directly included in birds diets have been proposed. This will thereby help consolidating the links between poultry and vegetable supply chains and contribute to the development of poultry production.

Key words: poultry, tropical, feeding systems, feed ingredients

Table des matières

Remerciements	3
Résumé	5
Résumé en anglais	6
Table des matières	7
Liste des figures	9
Liste des publications et communications orales	10
Introduction	11
Première partie : Etude bibliographique.....	14
1. Enjeux liés à la production des volailles en milieu chaud.....	15
1.1 Dynamiques d'évolution de la production mondiale d'œufs et de poulet de chair.....	15
1.2 Approvisionnement en matières premières pour l'alimentation des volailles	18
1.3 Difficultés techniques liées à l'alimentation animale en milieu chaud	21
1.3.1 Impact de la chaleur sur les performances de production des volailles	21
1.3.2 Régulation de l'ingestion des volailles en milieu chaud	24
2. Utilisation de ressources alimentaires alternatives dans l'alimentation des volailles en milieu chaud	27
2.1 Céréales	27
2.2 Sources de protéines.....	29
2.3 Matières premières ayant un potentiel de développement	31
3. Systèmes d'alimentation pour l'amélioration des performances des volailles en milieu chaud	33
3.1 Modalités d'apport de l'aliment	33
3.1.1 Principes et impacts de l'alimentation séquentielle sur les performances des volailles	35
3.1.2 Intérêts de l'alimentation en libre choix en milieu chaud	36
3.1.3 Présentation simultanée de deux aliments dans la même mangeoire : alimentation mélangée.....	38
3.2 Distribution de céréales entières ou broyées dans l'alimentation des volailles	39
4. Conclusions de l'étude bibliographique et objectifs de la thèse	40
Deuxième partie : Résultats.....	43
Chapitre 1 : Leviers d'actions pour le développement des filières de poules pondeuses en milieu chaud	44

Publication 1	45
Chapitre 2 : Substitution de deux matières premières limitantes en milieu chaud : quelles lois de réponses chez le poulet de chair ?	75
Publication 2 :	77
Publication 3 :	93
Chapitre 3 : Systèmes d'alimentation innovants chez la poule pondeuse : quelles applications en milieu chaud ?	108
Publication 4 :	110
Publication 5 :	127
Troisième partie : Discussion générale et Perspectives	129
1. Intérêts et implications économiques de l'utilisation de matières premières alternatives .	131
1.1 Complémentarité des approches méta-analyse et expérimentations <i>in vivo</i>	131
1.2 Simulation économique des scénarios possibles d'utilisation des matières premières alternatives chez le poulet de chair	136
2. Adaptation de la poule pondeuse en alimentation séquentielle et mélangée à l'élevage en milieu chaud	140
Conclusion.....	145
Résumé	161
Résumé en anglais	161

Liste des figures

Figure 1 : Répartition de la production mondiale d'œufs en 2011	17
Figure 2 : Répartition de la production mondiale de volailles de chair en 2012.....	17
Figure 3 : Evolution des approvisionnements en graines de soja (% production mondiale) entre 2000 et 2011, FAOSTAT (2014)	20
Figure 4 : Evolution des cours de blé, maïs et graines de soja (Chicago - en cents US par boisseau de 60 livres) entre 2000 et 2014	21
Figure 5 : Répartition de la production mondiale de quatre céréales alternatives en 2013 (en Mt).....	29
Figure 6 : Répartition de la production mondiale de quatre sources de protéines en 2013 (en Mt de protéines), Faostat, 2014	31
Figure 7 : Représentation schématique des principes de l'alimentation séquentielle (1), séparée (2) et mélangée (3)	34
Figure 8 : Différences relatives au témoin en fonction du taux de substitution du sorgho, du millet et du tourteau de coton : comparaison des données des essais <i>in vivo</i> aux données de la méta-analyse	135
Figure 9 : Différences de performances relatives au témoin en fonction du niveau de substitution du millet (%) chez la poule pondeuse.....	136
Figure 10 : Scénario 1 - Coût de l'aliment/kg de gain de poids relatif à un aliment témoin lorsque le millet et le sorgho sont achetées dans le nord du Bénin	139
Figure 11 : Scénario 2 - Coût de l'aliment/kg de gain de poids relatif à un aliment témoin pour des matières premières achetées auprès de détaillants dans le sud du Bénin.....	139
Figure 12 : Modalités des réponses dynamiques d'un système perturbé (Martin et Sauvart, 2010a).....	141
Figure 13 : Illustration des scénarios possibles d'adaptation à la chaleur pour des poules en alimentation séquentielle.....	142

Liste des publications et communications orales

Publications

- Batonon DI, M Traineau, I Bouvarel, L Roffidal, P Lescoat. 2014. Capacity of laying hens in sequential feeding to adjust their feed consumption when offered previously a nutritionally unbalanced diet. *European Poultry Science*, doi: 10.1399/eps.2014.37.
- Batonon DI, M Umar Faruk, P Lescoat, GM Weber, D Bastianelli. Inclusion of sorghum, millet and cottonseed meal in broiler diets: a meta-analysis of effects on performance. *Animal*. **Soumis**.
- Batonon DI, D Bastianelli, P Lescoat, GM Weber, M Umar Faruk. Simultaneous inclusion of sorghum and cottonseed meal or millet in broiler diets: effects on performance and nutrient digestibility. *Animal*. **Soumis**.
- Batonon DI, NK Sakomura, H Palma, M Bernardino, B Meda, P Lescoat. Sequential and loose-mix feeding of whole and ground corn with a balancer diet affect laying hens' performance under hot climate. *British Poultry Science*, **Soumis**.
- Batonon DI, Bastianelli D, Chrysostome CAAM, Duteurtre G and Lescoat P. Sécurisation des flux d'approvisionnement en matières premières et de mise en marché des produits dans le secteur avicole : cas de la filière œufs au Bénin. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*. **Soumis**.

Communications

- Batonon DI, P Lescoat, D Bastianelli, GM Weber, M Umar Faruk. 2014. A meta-analysis on the potential utilization of millet, sorghum and cottonseed meal in broiler feeding. Oral communication. *XVIth European Poultry Conference*, Stavanger, Norway, 23–27 June 2014.
- Batonon DI, F Houndonougbo, CAAM Chrysostome, G Duteurtre, D Bastianelli, P Lescoat. 2013. Dynamics of the Egg Value Chain in the Southern Benin. *The International Congress on Advancements in Poultry Production in the Middle East and African States*, Antalya, Turkey, 21-25 October 2013.
- Batonon DI, F Houndonougbo, CAAM Chrysostome, G Duteurtre, D Bastianelli, P Lescoat. 2013. La filière œufs au Sud-Bénin : organisation, contraintes et perspectives. *10^{èmes} Journées de Recherche Avicole*, la Rochelle, France. 26-28 March 2013.

Introduction

Au cours des dernières décennies, les productions avicoles ont eu une importante croissance en réponse à une augmentation de la demande mondiale en protéines animales, principalement dans les pays tropicaux (Rae et Ngaya, 2010). La production de viande de volaille a été multipliée par sept, la production d'œufs par 3,5 en 40 ans et les estimations de la FAO prévoient qu'à l'horizon 2050, la population mondiale devrait consommer 2,3 fois plus de viande de volaille qu'en 2010 (FAO, 2011). Il est très improbable de penser que cette demande soit couverte en élevant deux fois plus de volailles et en utilisant le même niveau de ressources naturelles (FAO, 2011). En effet, la demande en matières premières agricoles (exemple : maïs, blé et tourteau de soja) pour l'alimentation des animaux augmente de façon continue et importante (Ravindran, 2013a). L'écart entre l'offre et la demande de ces matières premières principales devrait se creuser au cours des décennies à venir (Ravindran, 2013b). De forts niveaux de volatilité des prix de ces matières premières ont été également observés sur les marchés même si la tendance est transitoirement à la baisse pour 2014. Par conséquent, les augmentations de production dans les pays chauds devraient plutôt provenir d'améliorations de l'efficacité des systèmes d'élevage avicoles à convertir les ressources naturelles en denrées alimentaires (FAO, 2011).

L'alimentation est l'un des enjeux majeurs de l'élevage avicole vu son rôle primordial dans le métabolisme animal, son coût économique (achat, transport et transformation des ingrédients) et son impact environnemental (expansion des surfaces agricoles, intensification des modes de cultures, rejets environnementaux). L'alimentation représente le poste de dépenses le plus important dont le coût représente 60 % du coût de production de l'œuf ou de la viande (ITAVI, 2013). Toute innovation permettant d'améliorer l'utilisation des nutriments par les volailles est une clé pour le développement des filières avicoles et l'amélioration de la compétitivité de celles-ci à une plus grande échelle.

Au nombre des solutions alimentaires mises en évidence dans la littérature pour améliorer l'efficacité des systèmes d'élevage en aviculture, on peut citer le mode de distribution de l'aliment (Traineau, 2014) ou la modification des apports à travers une diversification des matières premières incluses dans l'aliment (Blesbois, 2010 ; Ravindran, 2013b). Les techniques de présentation de l'aliment évoquées portent notamment sur une distribution alternée ou mélangée de deux types d'aliments dont la combinaison permet des apports nutritionnels équilibrés au cours de la journée. L'application de ces techniques a permis de réduire l'indice de consommation (Umar Faruk, 2010 ; Traineau, 2014). Les différents

travaux portant sur la l'utilisation de matières premières alternatives et sur l'applicabilité de systèmes d'alimentation innovants sont détaillés dans le chapitre suivant.

Le but de ce travail est d'étudier les voies d'amélioration possibles des systèmes d'alimentation pour le développement des filières avicoles en milieu chaud. En raison de leurs caractéristiques biologiques et de leurs finalités économiques (illustrées par la fourniture de protéines animales sur des pas de temps différents), l'étude de deux modèles animaux, le poulet de chair et la poule pondeuse, est apparue comme une approche complémentaire dans l'application des solutions alimentaires identifiées.

Une première *partie bibliographique* a permis de comprendre les enjeux liés à l'alimentation des volailles en climat chaud et d'identifier les solutions nutritionnelles possibles à l'échelle de l'animal. Afin d'apporter des réponses concrètes à la question de recherche posée, une *deuxième partie du travail réalisée au travers d'enquêtes* dans un pays à climat chaud et humide : le Bénin, a permis de déterminer des leviers d'actions pour le développement des filières avicoles en milieu chaud (*Publication 1*). La filière poule pondeuse a été choisie comme modèle d'étude.

Un travail de *méta-analyse* a été réalisé pour évaluer à l'échelle de l'animal les réponses globales à l'utilisation de matières premières substituables au maïs et au tourteau de soja (*Publication 2*). Afin de valider *in vivo* les résultats obtenus avec la méta-analyse et d'évaluer les interactions pouvant résulter d'une utilisation combinée des matières premières testées, *deux expérimentations* ont été réalisées chez le poulet de chair (*Publication 3*).

L'application des techniques d'alimentation séquentielle et mélangée a été testée via *deux expérimentations* en milieu chaud avec une attention particulière accordée à l'utilisation de ressources alimentaires tropicales (*Publications 4 et 5*). La poule pondeuse a été choisie comme modèle d'étude en lien avec les avantages mis en évidence lors de précédents travaux (Umar Faruk *et al.*, 2010a,b ; Traineau *et al.*, 2013). Enfin, la *discussion générale* analyse les résultats obtenus au regard de la littérature et, d'autre part remet en perspectives les intérêts pratiques de ces systèmes d'alimentation dans des élevages en milieu chaud, en particulier au Bénin.

Première partie :
Etude bibliographique

1. Enjeux liés à la production des volailles en milieu chaud

1.1 Dynamiques d'évolution de la production mondiale d'œufs et de poulet de chair

L'aviculture de type intensif est l'une des solutions privilégiées pour satisfaire les besoins croissants des populations en protéines animales. L'un des avantages essentiels de cette production est l'approvisionnement en œuf et en viande de poulet, sources de protéines à moindre coût. La demande mondiale en ces produits avicoles a augmenté très rapidement ces dernières années et reste stimulée par l'augmentation de la population, l'urbanisation dans les pays en développement et les prix élevés des viandes concurrentes (Magdelaine, 2014). Selon la FAO, les produits avicoles contribueraient à plus de 20 % de la consommation de viande en Afrique sub-saharienne, à environ 50 % en Egypte et dans les pays d'Amérique latine confrontés à l'insécurité alimentaire, et ce pourcentage est élevé dans les pays les plus pauvres du Moyen-Orient. Les estimations de la FAO prévoient qu'à l'horizon 2050, la population mondiale devrait consommer 2,3 fois plus de viande de volaille qu'elle ne le faisait en 2010 (FAO, 2011).

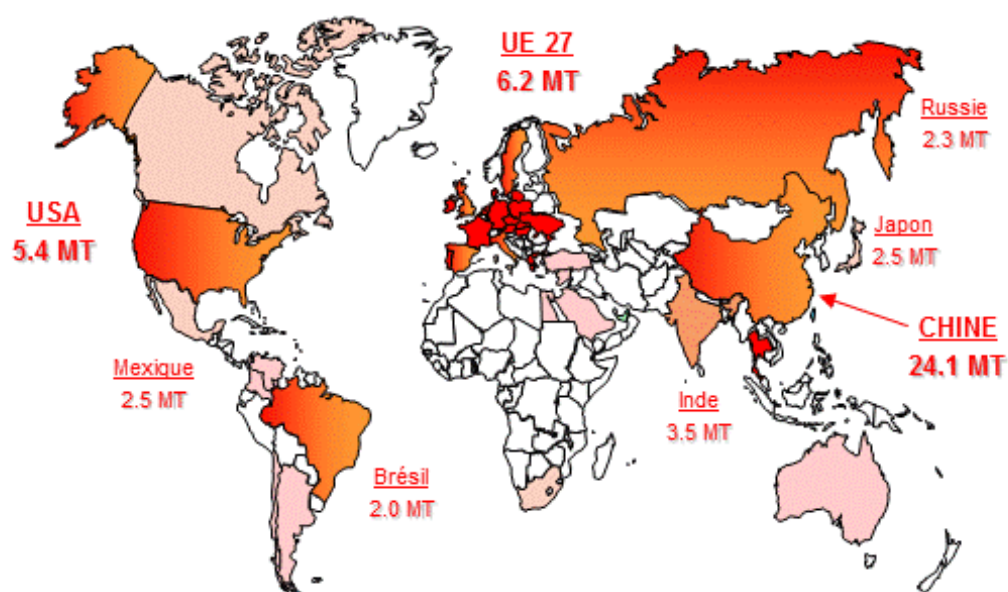
Les figures 1 et 2 illustrent les répartitions mondiales de la production d'œufs et de volaille de chair. Le continent asiatique est le premier producteur d'œufs avec en 2012 une part de 59 % de la production mondiale, suivi de l'Union Européenne et de l'Amérique du Nord, produisant respectivement 10 % et 9 % de la production mondiale (Faostat, 2014). La production de poulets de chair est répartie en 2012 entre l'Asie (34 % de la production mondiale), l'Amérique du Nord et Centrale (23 %), l'Amérique du Sud (17 %) et l'Europe (11%). Alors que la production d'œufs s'est stabilisée entre 2000 et 2012 dans l'Union Européenne (- 0,02 %/an) et en Amérique du Nord (+ 0,72 %/an), elle a connu une forte augmentation en Asie (+ 2,71 %/an) et en Amérique du Sud (+ 4,01 %/an). La production de poulets de chair connaît une croissance dans ces régions avec une hausse moyenne de +3,98 %/an. En Afrique, la production avicole semi-industrielle est à distinguer de la production avicole familiale qui fournit en partie les marchés de consommation (4,6 Mt de

poulet indigène et 7 512 t d'œufs produits en 2013). La production de poulet de chair africaine s'élevait à 4,7 Mt en 2012 et a connu un développement plus soutenu que la production d'œufs sur les dix dernières années (+ 5,17 % par an *vs.* + 4,51 % pour la production d'œufs). Cette dernière est répartie entre le Nigéria (21 % de la production africaine en 2012), l'Afrique du Sud (18 %), l'Algérie, l'Égypte et le Maroc (qui produisaient respectivement en 2013, 10 %, 10 % et 9 %). Le premier producteur de poulets de chair en Afrique est l'Afrique du Sud (32 % en 2013) suivie de l'Égypte (17 %) et du Maroc (12 %). Ces pourcentages élevés sont toutefois à relativiser étant donné les volumes relativement faibles en comparaison des autres continents.

Les statistiques montrent également l'apparition de nouveaux pays producteurs d'œufs et de volailles de chair sur le marché mondial. Trois des plus grandes économies émergentes : le Brésil, la Chine et l'Inde ont des industries avicoles à croissance rapide. La Chine est le plus grand producteur d'œufs : environ 24 Mt d'œufs en 2012, comparativement aux 3 Mt produites en Inde et aux 2 Mt au Brésil. La Chine produit également 13 Mt de viande de poulet alors que le Brésil en produit 11 Mt et l'Inde 2,2 Mt (Faostat, 2014).

Malgré cette dynamique de croissance internationale, la production avicole est confrontée à divers enjeux liés notamment à l'approvisionnement en matières premières pour l'alimentation des animaux, la mise en place de paquets techniques permettant de réduire l'incidence du climat chaud et à la maîtrise de l'ingestion pour une optimisation des performances de production.

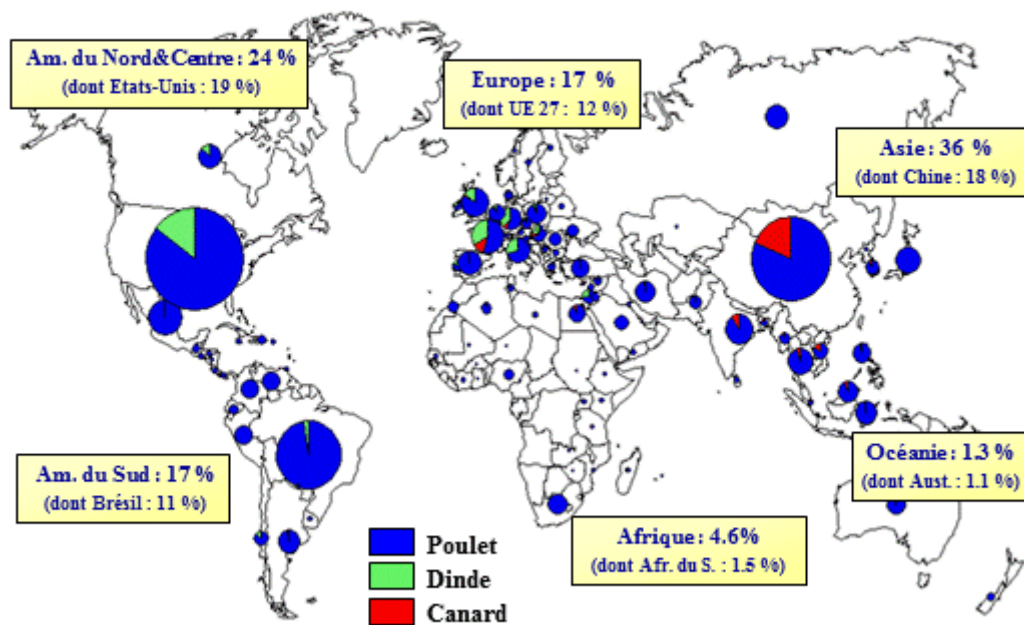
Production mondiale de 65 MT en 2011



Source : ITAVI d'après FAO et Commission Européenne

Figure 1 : Répartition de la production mondiale d'œufs en 2011

Production mondiale de 104.5 MT en 2012



Source : FAO, 2013

Figure 2 : Répartition de la production mondiale de volailles de chair en 2012

1.2 Approvisionnement en matières premières pour l'alimentation des volailles

L'aviculture représente un important débouché des filières grandes cultures. En effet, les aliments destinés aux volailles sont majoritairement constitués de céréales (blé et maïs) et de soja. En France, les aliments des volailles sont composés en moyenne de 34 % de blé, 27 % de maïs, 27 % de tourteau de soja et 12 % d'autres matières premières telles que l'huile ou le tourteau de tournesol (Bouvarel *et al.*, 2014). Suite à l'évolution de la production mondiale de volaille et au développement des filières porcines, il y a une demande croissante en ces matières premières, sources d'énergie et de protéines (Rae et Ngaya, 2010). Au regard des possibilités de production de maïs dans diverses zones agro-écologiques, la production mondiale est apte à fournir les quantités nécessaires à l'industrie animale. En revanche, l'apport protéique dans l'aliment se fait principalement par le tourteau de soja dont la culture nécessite des conditions pédoclimatiques particulières. La figure 3 montre l'évolution des niveaux de production et d'exportation de soja au Brésil (a) et les niveaux de production et d'importation de soja dans diverses régions : la Chine (b), l'Union Européenne (c) et l'Afrique (d). La production de soja est assez concentrée dans certaines régions (Amériques) qui en sont également de très gros consommateurs. Les principaux pays producteurs en 2013 étaient les Etats-Unis (89 Mt), le Brésil (82 Mt) et l'Argentine (49 Mt). D'autres grandes régions de production animale (Europe, Chine) sont fortement importatrices et en produisent très peu. L'Afrique, acteur encore mineur, varie ses approvisionnements entre importations et production de soja avec des importations qui augmentent plus rapidement que la production. Selon Ravindran (2013b), l'écart entre l'offre et la demande de soja devrait se creuser au cours des décennies à venir, soulignant ainsi la nécessité de s'orienter vers l'utilisation de ressources alimentaires alternatives ou la mise en place de filières végétales adaptées (Bouvarel *et al.*, 2014).

Par ailleurs, la production avicole est confrontée à une forte volatilité des prix de matières premières agricoles entrant dans la composition des aliments distribués. La figure 4 montre l'évolution des prix des trois principales matières agricoles sur les marchés internationaux entre 2000 et 2014. Ces dernières années, les prix de ces matières premières ont largement fluctué avec une tendance à la hausse. Il semble apparaître un phénomène de découplage des prix entre matières premières avec une augmentation relative plus forte du soja, depuis octobre 2008. Ces variations ont affecté les prix sur les marchés intérieurs, avec pour

corolaire une variabilité plus forte dans certains pays en développement comme le Bénin, la Côte d'Ivoire ou le Sénégal (Diallo *et al.*, 2011). En 2014, compte tenu des conditions de croissance dans les principales zones de production et de stocks abondants, la situation semble différente avec une baisse enregistrée des prix des céréales sur les marchés internationaux (-11,7 % en août 2014 par rapport à août 2013, FAO, 2014). Néanmoins, les perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2013-2022 prévoient que les prix des produits agricoles resteront à moyen terme supérieurs aux moyennes antérieures. Cette projection de volatilité des prix de céréales serait liée à un effet combiné du ralentissement de la croissance de la production agricole, de la hausse de la demande émanant des pays émergents et pays en développement pour la satisfaction des besoins des filières animales et la production accrue de biocarburants (OCDE/FAO, 2014). Les projections indiquent également que tous les prix de la filière oléagineuse devraient augmenter durant la prochaine décennie sous l'effet de la forte demande d'huile végétale et de tourteaux. La consommation mondiale de tourteaux devrait augmenter de 27 % à l'horizon 2023 dont 84 % attribuables aux pays en développement. La demande de tourteaux est essentiellement induite par la croissance de la production de non-ruminants et de lait dans les pays en développement et par un taux plus élevé d'incorporation de protéines dans les aliments pour animaux. Dans les pays développés, l'incorporation des tourteaux dans l'alimentation des animaux devrait rester stable. Toutefois, pour répondre à ces demandes importantes de matières premières, une expansion des surfaces consacrées à la production végétale est à prévoir avec des conséquences environnementales (détérioration des sols par l'utilisation d'engrais chimiques, rareté de l'eau, etc.) dans plusieurs zones de production (OCDE/FAO, 2014). La production avicole dans les pays en développement est ainsi face à différents enjeux d'ordre économique (amélioration de la compétitivité, flexibilité en termes de matières premières disponibles), environnemental (limitation des impacts environnementaux et utilisation des ressources) et social (création d'emplois, coordination sociales pour le fonctionnement des filières, compétition homme-animal dans l'utilisation des ressources) qui méritent d'être pris en compte pour garantir la sécurité alimentaire des populations de ces pays. Face à cette multiplicité d'enjeux liés à la production avicole en régions tropicales, une *étude de la filière de production d'œufs* a été réalisée au Bénin afin de comprendre les mécanismes sous-tendant l'organisation et la structuration d'une filière tropicale et les stratégies mises en place par les acteurs pour faire face aux enjeux du marché.

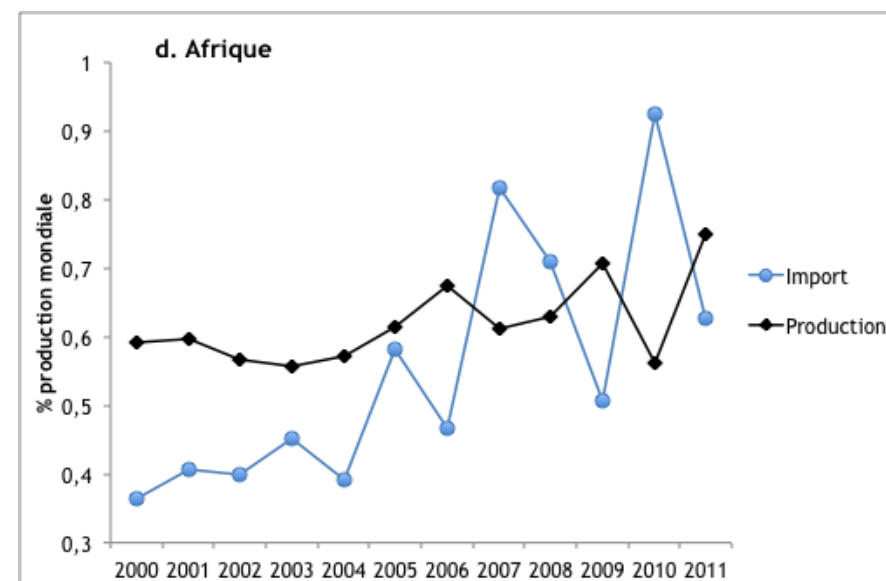
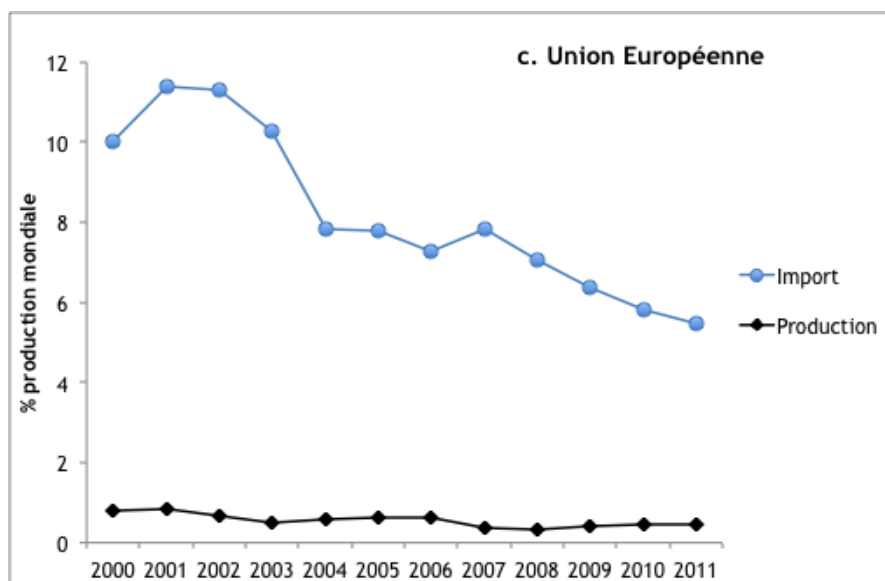
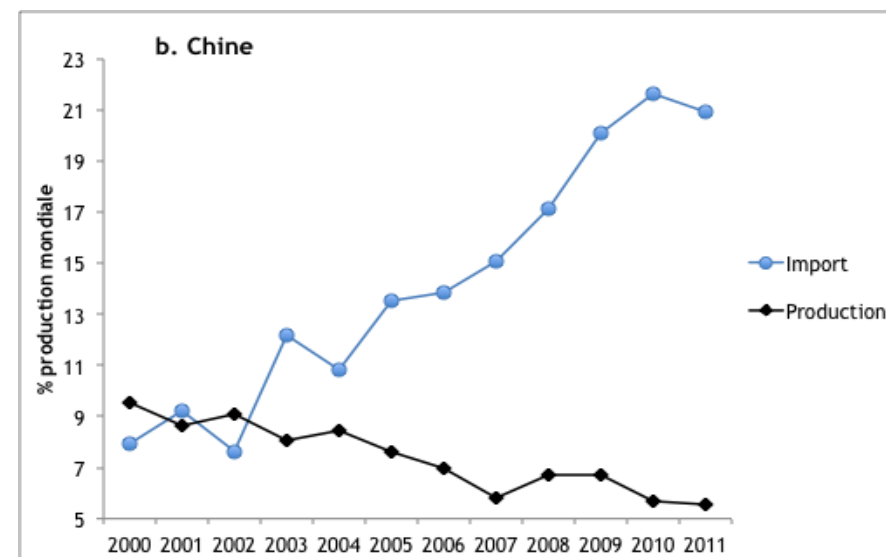
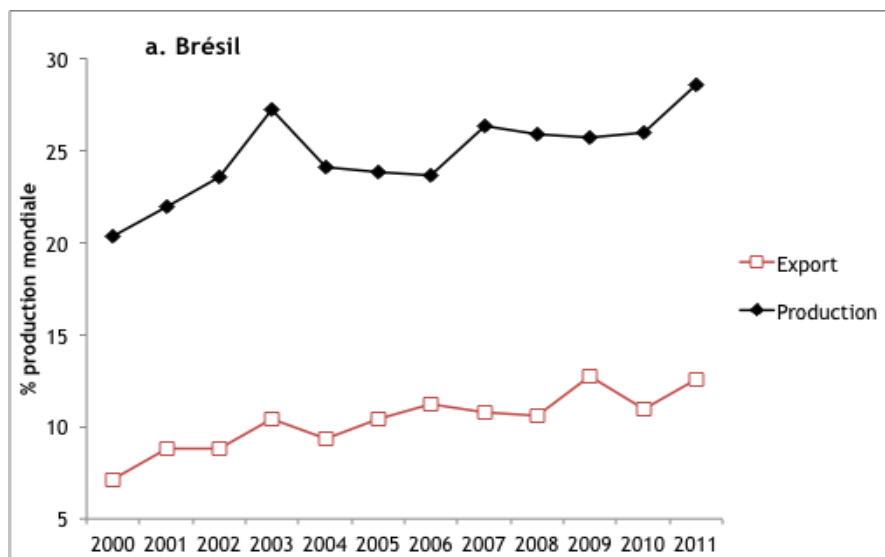


Figure 3 : Evolution des approvisionnements en graines de soja (% production mondiale) entre 2000 et 2011, FAOSTAT (2014)

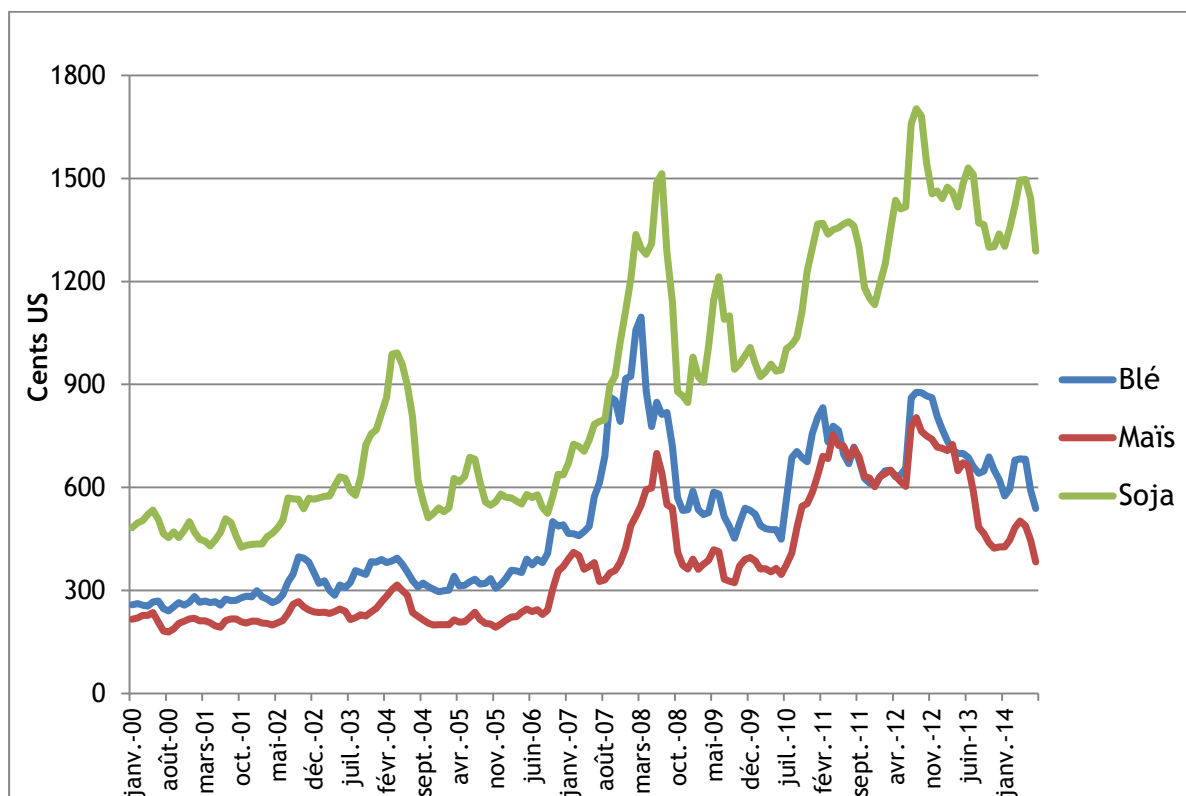


Figure 4 : Evolution des cours de blé, maïs et graines de soja (Chicago - en cents US par boisseau de 60 livres) entre 2000 et 2014

Source : INSEE - Division Synthèse conjoncturelle, 2014

1.3 Difficultés techniques liées à l'alimentation animale en milieu chaud

1.3.1 Impact de la chaleur sur les performances de production des volailles

La production avicole dans les zones tropicales peut être affectée par plusieurs facteurs, notamment les conditions environnementales. En effet, la chaleur excessive est l'une des contraintes majeures en élevage avicole en raison des incidences négatives sur les performances de production des volailles et des pertes économiques engendrées, en particulier lorsque des bâtiments de type ouverts sont utilisés (Picard *et al.*, 1993). En production avicole, le stress thermique désigne la réaction de l'animal à des températures ambiantes élevées ou froides. Il peut être qualifié de stress aigu ou chronique. Le stress thermique aigu ou coup de chaleur correspond à une augmentation relativement brutale de la température

ambiante pendant une durée brève (de Basilio et Picard, 2002). Cette variation brusque de la température ambiante entraîne des réactions comportementales et physiologiques qui assureront la survie de l'animal. Par contre, le stress thermique chronique apparaît lors d'une exposition à des températures ambiantes élevées pendant une période longue, généralement de nature cyclique avec des températures élevées le jour et plus fraîches la nuit.

Pour s'adapter à son environnement, l'animal met en place des mécanismes physiologiques lui permettant de réguler sa production de chaleur (Nichelmann et Tzsechentke, 2002). Les oiseaux sont des animaux homéothermes qui maintiennent leur température corporelle dans une fourchette restreinte malgré les variations de la température ambiante (Yahav *et al.*, 2009). Cette capacité est assurée par la fonction de thermorégulation qui garantit l'équilibre entre la production de chaleur (thermogenèse) et les pertes de chaleurs (thermolyse). Une poule pondeuse ou un poulet de chair soumis à une température ambiante élevée augmente dans un premier temps le flux sanguin vers ses tissus périphériques dépourvus de plumes (crête, barbillon, pattes) afin d'éliminer sa production de chaleur par radiation et conduction. Lorsque cette perte de chaleur ne suffit pas en cas de fortes températures ($> 29^{\circ}\text{C}$ ou à partir de 27°C en cas d'humidité élevée), l'augmentation du rythme respiratoire est indispensable pour accroître cette déperdition de chaleur par voie latente. Ce mécanisme est d'autant plus efficace que l'humidité relative est faible (Yahav, 2009). Cependant, la capacité de la poule ou du poulet à éliminer la chaleur par voie sensible ou par évaporation est limitée. Or, l'ingestion et l'utilisation métabolique de l'aliment entraînent systématiquement une forte production de chaleur. Ainsi, l'animal compense les effets de la chaleur en réduisant l'extra-chaleur en lien avec l'alimentation par une diminution de l'ingéré alimentaire ou du nutriment spécifique induisant une production excessive de chaleur (Mashaly *et al.*, 2004 ; Syafwan *et al.*, 2012). L'ingestion d'un excès de glucides produit une augmentation de la chaleur équivalente à 10-15% de l'énergie métabolisable tandis que la graisse peut en produire entre 0 et 5 %. Les protéines ont une plus forte contribution à la thermogénèse alimentaire par rapport aux glucides ou aux lipides (Tasaki et Kushima 1979 ; Musharaf et Latshaw, 1999). De plus, un excès d'apport ou un déséquilibre en acides aminés entraîne un catabolisme accru et une production de chaleur augmentée. Par ailleurs, le problème étant majoritairement lié au métabolisme, ce sont les animaux les plus productifs qui souffrent le plus des effets de la chaleur. Les animaux très productifs consomment plus, produisent davantage de chaleur métabolique et dégagent plus de chaleur à la suite de la digestion des aliments. Ainsi, ils

ressentent plus fortement les effets de la chaleur que les animaux moins productifs ayant une prise alimentaire moindre (Renaudeau *et al.*, 2012).

Les effets de la température ambiante sur les performances des volailles semblent donc notamment agir via la nutrition (Geraert, 1991). Cette diminution de l'ingéré alimentaire réduit les nutriments essentiels (protéine, acides aminés essentiels, minéraux et vitamines) disponibles pour les besoins d'entretien et de production de l'animal (Larbier et Leclercq, 1992). Selon Peguri et Coon (1991) et Cheng *et al.* (1997), l'augmentation de la température réduit les performances de production chez les volailles en raison d'une restriction des apports en nutriments. Smith et Oliver (1972) ont distingué chez la poule pondeuse, l'impact d'une faible consommation alimentaire de l'effet des perturbations physiologiques émanant d'un stress thermique. Ils ont montré que la chute de consommation d'aliment a une influence significative sur la production d'œufs et le poids des œufs contrairement à la qualité de l'œuf qui serait davantage modifiée par les perturbations physiologiques liées à un stress thermique (alcalose respiratoire). Chez la poule, une exposition à la chaleur entraîne une réduction de la production d'œufs, du poids corporel, du poids des œufs et de la qualité de l'œuf (Travel *et al.*, 2010). Le poulet exposé à de fortes chaleurs diminue sa vitesse de croissance (Al-Fataftah et Abu-Dieyeh, 2007). Plusieurs auteurs ont montré que sous l'effet d'un stress thermique, les poulets réduisent le gain de protéines mais accroissent le dépôt de graisses, en particulier au niveau des tissus sous-cutanés (Ain Baziz *et al.*, 1996 ; Tenim *et al.*, 1999). La réduction du dépôt protéique s'expliquerait selon Tenim *et al.* (2000) par une faible capacité de synthèse des protéines chez ces animaux. Toutefois, sous des conditions de chaleur modérée, le besoin de thermogenèse est diminué et l'indice de consommation est amélioré. À une température supérieure, la consommation et les performances diminuent, maintenant ainsi l'indice de consommation alors que sous des conditions de température très élevée, l'efficacité alimentaire est dégradée suite à une croissance très ralentie (Renaudeau *et al.*, 2012).

Par ailleurs, la baisse des performances chez les volailles soumises à des températures hautes dépend du niveau et de la durée d'exposition à un stress thermique. Lorsque les températures augmentent progressivement et restent élevées pendant une période prolongée, les poules pondeuses peuvent s'acclimater et maintenir la production d'œufs et le poids corporel à des niveaux satisfaisants. Cependant, les changements de chaleur sur une courte période compromettent la capacité des oiseaux à s'acclimater (Daniel et Balnave, 1981). La consommation d'aliments peut diminuer de 4 % par degré au-dessus de la zone de neutralité thermique, comme l'ont montré Mardsen et Morris (1987). En outre, la production d'œufs

diminue plus rapidement à 30°C quand l'apport nutritionnel total est insuffisant pour favoriser une ponte optimale (Balnave et Brake, 2005). La température ambiante, l'humidité relative et la ventilation sont trois facteurs environnementaux qui jouent un rôle majeur dans la thermorégulation. L'effet de la température peut être exacerbé par une humidité relative élevée ou *a contrario* modéré par une ventilation adaptée du bâtiment (Yahav, 2000 ; Lin *et al.*, 2005). Selon Balnave et Brake (2005), une ventilation adaptée augmente l'élimination de la chaleur par les animaux. Lorsque la ventilation est combinée à un refroidissement par évaporation d'eau, cela favorise l'apparition d'un cycle de température et réduit l'impact négatif de fortes températures sur les performances.

La température d'élevage influence également la consommation d'eau. L'animal compense ses pertes par une ingestion importante d'eau. En climat chaud, les pertes d'eau par évaporation peuvent être multipliées par 15 par rapport à celles des conditions de thermo-neutralité, entraînant ainsi une augmentation de la consommation d'eau multipliée par deux entre 21 et 32°C, voire par trois au delà de cette température (Larbier et Leclercq, 1992 ; Balnave et Brake, 2005).

1.3.2 Régulation de l'ingestion des volailles en milieu chaud

Une question importante en milieu chaud concerne les mécanismes de régulation et de maîtrise de l'ingestion d'aliment chez la volaille. L'animal ingère des aliments dont les nutriments sont ensuite dégradés et absorbés afin d'assurer le métabolisme basal, l'homéothermie, les biosynthèses ainsi que les activités physiques (Bouvarel *et al.*, 2010a). La régulation de l'ingestion chez la volaille est liée à la nécessité de limiter l'encombrement de l'aliment ingéré et d'assurer des apports d'énergie et de nutriments réguliers (Bouvarel *et al.*, 2010a). En effet, l'ingestion est stimulée par différents facteurs sensoriels, digestifs et métaboliques (Blundell, 1991). L'animal répond à des stimuli internes (hormones, niveaux en nutriments, stockage d'énergie) et environnementaux (disponibilité de l'aliment, caractéristiques de l'aliment, photopériode, température) lui permettant de maintenir un équilibre énergétique dont le centre de régulation est situé au niveau hypothalamique (Woods *et al.*, 1998 ; Bouvarel *et al.*, 2010a). Ainsi, chez la volaille exposée à des températures optimales, le niveau d'ingestion dépend de la teneur énergétique de l'aliment. Plusieurs expérimentations ont étudié l'effet de la teneur en énergie de l'aliment sur la consommation et les performances de production et ont montré que la variation de l'ingéré est une fonction linéaire de la variation de la concentration énergétique de l'aliment (Bouvarel *et al.*, 2010b).

Harms *et al.* (2000) ont montré que les poules recevant des régimes à faible teneur en énergie avaient une consommation alimentaire supérieure à celle des poules recevant un aliment témoin. Il a été également démontré qu'exposé à des températures optimales, le poulet de chair à croissance rapide diminue la quantité d'aliment consommée avec une augmentation du niveau d'énergie dans l'aliment (Quentin *et al.*, 2003). En revanche, en régions chaudes, le climat représente un facteur limitant à la production puisque la consommation énergétique des volailles est largement affectée. L'animal diminue sa consommation énergétique afin d'assurer son homéothermie. Cette baisse de consommation suit selon Mc Donald (1978) une progression curvilinéaire, avec une diminution par degré d'augmentation pouvant être quatre fois supérieure entre 30 et 35°C à celle observée entre 10 et 20°C (Picard, 1985 ; Mardsen and Morris, 1987).

Le niveau de protéines dans l'aliment n'a pas été mis en évidence comme étant en lui-même un facteur majeur de régulation de l'ingestion. Une étude réalisée par Summers et Leeson (1993) a en effet montré qu'aucune différence d'ingestion alimentaire n'existe entre des poules pondeuses recevant un aliment déficient en protéines et un aliment témoin. D'autres études ont également démontré qu'une réduction de la teneur en protéines d'un aliment n'affectait pas la consommation alimentaire des poules ou des poulets (Sabino, 2001 ; Mohiti-Asli *et al.*, 2012). Toutefois, la modulation de l'ingestion dépend de la concentration et de l'équilibre en acides aminés des aliments distribués. Chez des poulets placés en situation de libre-choix en milieu chaud, une préférence a été observée pour l'aliment à forte teneur en protéines (62 % de la consommation totale) comparé à un autre avec une plus faible teneur en protéines (Hruby, 1995). Les auteurs ont souligné qu'il existait un déséquilibre en acides aminés lié notamment à la baisse de la consommation alimentaire totale pour des régimes pour lesquels une carence en protéines n'a pas été anticipée en milieu chaud. Cependant, il n'y a aucune raison d'avancer que les besoins des volailles en protéines/acides aminés seraient plus élevés en milieu chaud qu'en conditions environnementales optimales (Austic, 1985 ; Sakomura, 1998).

Par ailleurs, l'ingestion est affectée indépendamment de la température par d'autres facteurs liés notamment à la forme ou à la couleur de l'aliment, aux modalités d'apport de l'aliment ou encore à la connaissance préalable de l'aliment (Bouvarel *et al.*, 2010a). La perception visuelle des particules alimentaires implique chez l'animal une distinction entre particules claires et plus foncées. Lecuelle *et al.* (2011) ont par exemple mis en évidence une préférence pour des particules plus claires. La perception tactile des particules intervient également dans

la préhension et l'ingestion de l'aliment par les volailles. Les volailles consomment les particules suffisamment grosses pour être efficacement saisies par le bec (Rodgers, 1995). Un aliment offert sous forme granulée est plus consommé qu'un aliment distribué en farines (Yo *et al.*, 1997 ; Quentin *et al.*, 2004). Un tri particulière peut être observé lorsque le choix est donné aux volailles lors de la distribution d'un mélange de céréales avec un aliment plus finement broyé (Nir *et al.*, 1994). La distribution de céréales entières chez des poulets ou des poules pondeuses a également permis de montrer une plus forte consommation de celles-ci en comparaison de céréales offertes sous forme concassée (Yo *et al.*, 1997 ; Safaa *et al.*, 2009). Ces éléments liés aux modalités d'apport de l'aliment sont présentés plus largement dans les sections suivantes.

2. Utilisation de ressources alimentaires alternatives dans l'alimentation des volailles en milieu chaud

L'aviculture en régions chaudes peut être limitée par (i) de fortes chaleurs qui ont des incidences sur les performances de production des animaux et (ii) une dépendance vis-à-vis de l'importation, pour beaucoup de pays, de céréales et du soja. Face à la demande croissante en matières premières et à la volatilité des prix observés sur les marchés, il devient nécessaire de trouver des alternatives aux matières premières classiquement utilisées (maïs et tourteau de soja). Les études réalisées à ce sujet chez la volaille peuvent être regroupées selon Dagher (2008) en trois classes : les matières premières sources d'énergie (céréales et leurs sous-produits), les sources de protéines et les « nouvelles » matières premières. La liste de matières premières présentées ne se veut pas exhaustive (Feedipedia, 2014) mais elle apporte des pistes de valorisation de produits locaux.

2.1 Céréales

Les céréales les plus utilisées en alimentation de la volaille au niveau mondial sont : le maïs et le blé. Néanmoins, d'autres céréales sont produites et disponibles à grande échelle (Figure 5). L'orge est largement cultivée dans le monde et majoritairement produite en Europe (144 Mt en 2013, Faostat 2014). L'utilisation de l'orge à des niveaux élevés chez la volaille détériore les performances de croissance, en particulier chez les jeunes oiseaux (Jeroch et Danicke, 1995). Elle peut être incorporée jusqu'à 30 % dans les aliments des adultes sans incidence négative sur la croissance (Brake *et al.*, 1997). L'orge contient également des β -glucanes qui augmentent la viscosité au niveau de l'intestin et réduisent la digestibilité des nutriments (Chesson, 2001). L'utilisation d'enzymes (principalement des β -glucanases) est donc recommandée dans des régimes à base d'orge (Bedford et Partridge, 2010) et permet ainsi une valorisation nettement plus élevée.

Le millet est une céréale cultivée dans les régions tropicales et certaines régions tempérées. Le nom millet regroupe plusieurs espèces botaniques (*Pennisetum glaucum*, *Panicum miliaceum* L., etc.) dont la composition varie également selon la zone de production (FAO/INPHO, 1995). Les trois premiers producteurs mondiaux en 2013 étaient l'Inde (36 % de la production mondiale), le Nigéria (17 %) et le Niger (10 %). Plusieurs études ont montré l'intérêt de

l'utilisation du millet en remplacement du maïs chez la volaille mais avec des résultats variables. Davis *et al.* (2003) et Hidalgo *et al.* (2004) ont montré que des performances équivalant à celles d'un régime à base de maïs sont obtenues avec du millet alors que Baurhoo *et al.* (2011) ont mis en évidence une amélioration de l'efficacité alimentaire avec des régimes à base de millet. Mohan Kumar Ravi *et al.* (1991) ont constaté que l'incorporation du millet à 60 % dans l'alimentation de la poule n'a aucune influence sur la production d'œufs, l'ingestion, l'indice de consommation ou encore le poids corporel. En revanche, Korane *et al.* (1991) mesurent une diminution de la production d'œufs pour des niveaux d'incorporation dans l'aliment allant à 55 %.

Le sorgho est la cinquième céréale la plus produite au monde et est utilisé dans l'alimentation des volailles, notamment dans plusieurs pays en Asie (Heuzé *et al.*, 2012). L'utilisation du sorgho chez la volaille a permis selon Jacob *et al.* (1996) d'avoir des performances similaires à un régime à base de maïs. Néanmoins, selon les variétés utilisées, une réduction de la consommation alimentaire et de la vitesse de croissance (Jacobs et Parsons, 2013) peut être observée en raison de la présence de tannins et de phytate. Ces deux facteurs antinutritionnels formeraient des complexes avec les protéines et l'amidon (Selle *et al.*, 2010), conduisant ainsi à une réduction de la digestibilité de l'amidon et de l'azote, avec pour conséquence une réduction des performances de production chez l'animal.

Le triticales est très peu disponible à l'échelle internationale. Il s'agit d'une céréale résultant du croisement entre le blé et le seigle. Fernandez et McInnes (1974) et Wilson et McNab (1975) ont montré lors d'une substitution du maïs par du triticales, que les poids vifs étaient plus faibles chez les poulets ayant reçu du triticales. Leeson et Summers (1987) ont observé une diminution de la performance de ponte chez des poules recevant des aliments à base de triticales. Les études indiquent que le triticales peut remplacer en partie le maïs ou le blé dans les aliments pour volaille à condition qu'un apport supplémentaire d'acides aminés soit réalisé.

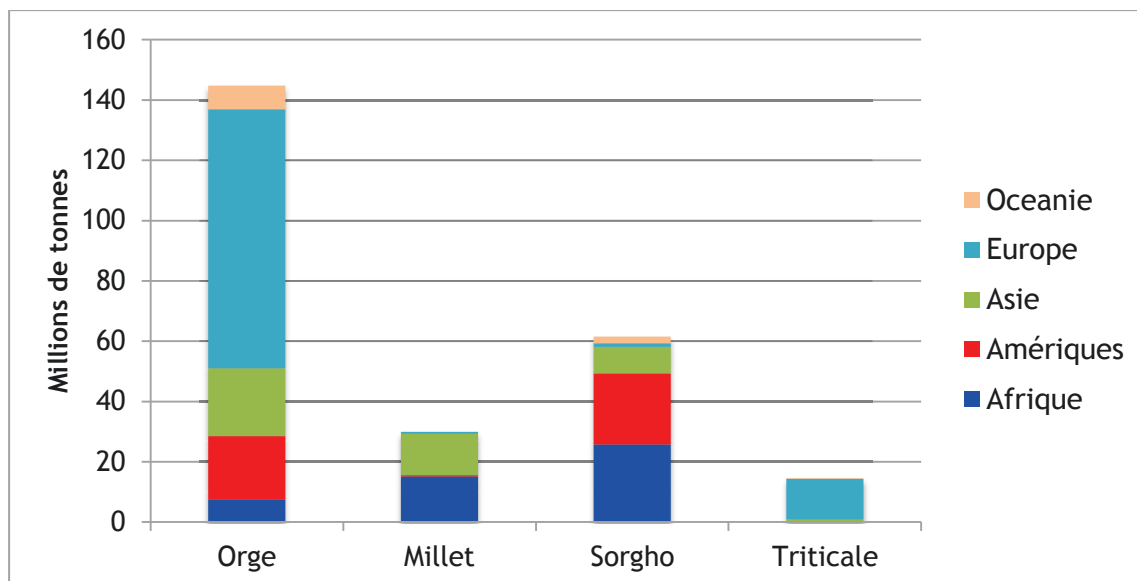


Figure 5 : Répartition de la production mondiale de quatre céréales alternatives en 2013 (en Mt)

2.2 Sources de protéines

Nous discuterons dans cette section des matières premières oléagineuses riches en protéines, utilisées dans l'alimentation animale. La répartition mondiale de trois sources de protéines est présentée figure 6. L'une de ces matières premières, le tourteau de coprah est issue du coprah (noix de coco séchée). Il s'agit d'une matière première peu onéreuse qui aurait un intérêt à être utilisée dans l'alimentation de la volaille en raison de sa disponibilité dans les régions tropicales. Cependant, elle présente des caractéristiques nutritionnelles peu optimales : faible teneur en acides aminés soufrés, forte teneur en fibre (Heuzé *et al.*, 2013). Plusieurs auteurs ont observé chez des poulets nourris avec des régimes à base de tourteau de coprah une baisse de la croissance et une augmentation de la consommation alimentaire à des niveaux d'inclusion supérieur à 10-20 % (Sundu *et al.*, 2006 ; Bastos *et al.*, 2007). La diminution de la croissance est plus prononcée chez les jeunes animaux (Bastos *et al.*, 2007). Aucune incidence négative n'a été rapportée sur les performances des poules pondeuses avec des niveaux d'incorporation allant jusqu'à 20 % (Braga *et al.*, 2005; Lima *et al.*, 2007.). Pour des niveaux plus élevés, une dégradation du poids corporel et de la ponte a été observée (Moorthy *et al.*, 2010).

Bien que riche en protéines, le tourteau de coton est pauvre en lysine et méthionine comparé au tourteau de soja. Les principales limites d'utilisation de cette matière première chez la

volaille sont sa teneur élevée en fibres et la présence de gossypol. Ce dernier est connu pour se lier à la lysine et réduire sa disponibilité et son absorption au niveau de l'intestin (Nagalakshmi *et al.*, 2007 ; Daghir, 2008). Selon certaines études (Azman et Yilmaz, 2005), le tourteau de coton peut être utilisé chez le poulet et la poule sans détériorer les performances. En revanche, d'autres études (Watkins *et al.* (1993) ont rapporté une ingestion plus élevée et un indice de consommation dégradé chez des volailles recevant des aliments à base de tourteau de coton.

Les études réalisées avec du tourteau d'arachide indiquent que cette matière première ne devrait pas être utilisée en remplacement total du tourteau de soja. Dans les régimes à base de tourteau d'arachide formulés isoénergétiques et isoprotéiques, un déficit en méthionine et en lysine a été mis en évidence par Daghir *et al.* (1969) et Zhang et Parsons (1996). Costa *et al.* (2001) ont comparé les performances des poulets de chair recevant des régimes à base de tourteau d'arachide supplémentés avec de la lysine, la méthionine et la thréonine à des régimes à base de tourteau de soja. Les résultats obtenus ont permis de conclure que cette matière première pouvait être utilisée dans ces conditions chez le poulet jusqu'à 20 % d'incorporation.

Le tourteau de palmiste est un sous-produit de la production d'huile de palmiste. Il s'agit d'une matière première variable dont la valeur énergétique dans l'alimentation de la volaille dépend fortement de sa teneur en matière grasse (Heuzé *et al.*, 2014). Une augmentation de l'ingestion a été observée chez des poulets nourris avec des régimes à base de tourteau de palmiste mais les performances de croissances étaient similaires à celles d'un aliment témoin pour des taux d'incorporation allant jusqu'à 30 % (Ezieshi et Olomu, 2008 ; Bello *et al.*, 2011). Les performances de ponte chez la poule pondeuse ont été également rapportées pour des régimes contenant jusqu'à 25 % de tourteau de palmiste comme équivalentes à celles d'un aliment témoin (Chong *et al.*, 2008). Néanmoins, l'indice de consommation était plus élevé, dû à une plus forte consommation d'aliment.

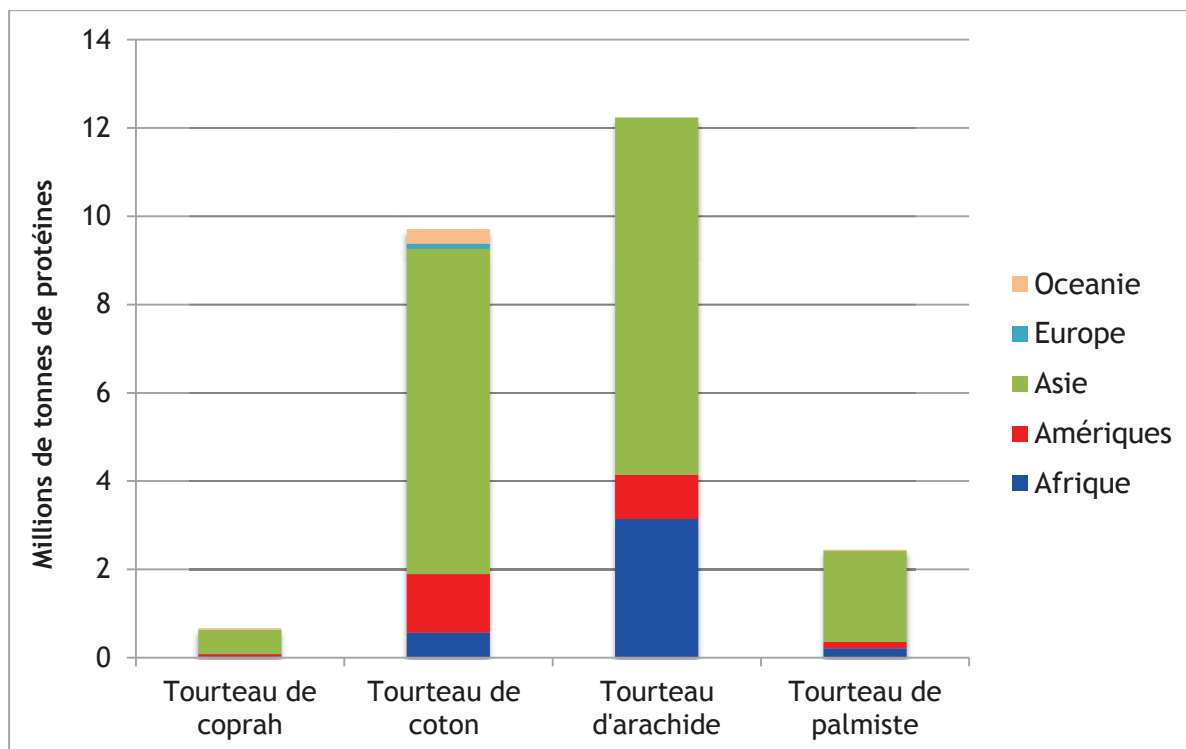


Figure 6 : Répartition de la production mondiale de quatre sources de protéines en 2013 (exprimées en Mt de protéines), Faostat, 2014

2.3 Matières premières ayant un potentiel de développement

Les matières premières présentées dans cette section sont celles dont l'utilisation actuelle dans les régions chaudes semble en deçà de leur potentiel quantitatif et qualitatif. Elles représentent en conséquence une cible intéressante pour la recherche et le développement.

La farine de manioc est une matière première riche en glucides, issue des racines de manioc. Il existe une grande variabilité de réponses des poulets à cette farine. Ceci est principalement dû à la présence d'acide cyanhydrique dans certaines variétés (variétés « amères ») qui est connu pour son effet négatif sur la croissance des volailles (Egbunike *et al.*, 2009). Cependant, certaines études mentionnent un maintien des performances de croissance avec des régimes contenant jusqu'à 15% de farine de manioc (Osei, 1992; Nwokoro et Ekhsuehi, 2005). Eruvbetine et Afolami (1992) ont distribué des régimes avec 40 % de farine manioc à des poulets de chair au Nigeria et n'ont observé aucun effet significatif sur le poids corporel, l'indice de consommation ou la mortalité. Au Brésil, pour des niveaux de substitution de 75 % du maïs par de la farine de manioc séché, aucune incidence négative n'a été mise en évidence sur le gain de poids ou l'indice de consommation (Fuentes *et al.*, 1992). Toutefois la

faiblesse de la teneur du manioc en protéines oblige à un recours accru à des sources de protéines dans la formule.

Il existe d'autres matières premières comme les légumineuses à grains qui ont un potentiel important dans l'alimentation des volailles mais dont les valeurs nutritionnelles méritent d'être améliorées par des traitements technologiques en raison de facteurs antinutritionnels (facteurs antitrypsiques, lectines, tannins, etc.). Ces matières premières ont fait l'objet de nombreuses publications (Daghir, 2008) mais leur disponibilité n'est pas toujours assurée à grande échelle. Elles peuvent toutefois être intéressantes à un niveau local ou chez des animaux moins productifs. Parmi ces graines, on peut citer le niébé (*Vigna unguiculata* L. Walp.). Séchées, les graines de niébé peuvent être incorporées jusqu'à 20 % dans l'alimentation des poulets de chair sans effet négatif sur le gain de poids, l'indice de consommation et la qualité de la carcasse (Trompiz *et al.*, 2002 ; Chakam *et al.*, 2010). Belal *et al.*, (2011) ont montré que le décortilage, la cuisson ou l'addition d'enzymes permet d'accroître la valeur nutritionnelle du niébé, améliorant ainsi les performances de production chez le poulet.

Une autre légumineuse disponible pour l'alimentation de la volaille est le mucuna (*Mucuna pruriens* L.). Les graines de mucuna sont utilisées chez la pintade mais dont l'utilisation est déconseillée chez le poulet en raison d'une présence très marquée de facteurs antinutritionnels (Daghir, 2008) nocifs même à de très faibles niveaux d'incorporation : 5 % (Emiola *et al.*, 2007; Tuleun et Igba, 2008). Une mortalité importante peut être enregistrée à des niveaux d'inclusion plus élevés (Del Carmen *et al.*, 1999). Son utilisation chez la poule pondeuse entraîne une réduction de la production d'œufs (Tuleun *et al.*, 2008). Ces résultats sont améliorés lorsque la valeur nutritionnelle de cette matière première est modifiée au moyen de traitements technologiques (à la chaleur en autoclave, décortiquées, etc.). Par ailleurs, le canavalia (*Canavalia ensiformis* L.) est une autre légumineuse dont l'utilisation en alimentation de la volaille est limitée par la présence de facteurs antinutritionnels et le coût d'approvisionnement. Des auteurs ont mesuré chez des poussins recevant des aliments contenant jusqu'à 30 % de canavalia bouillis dans l'eau ou à l'autoclave une consommation alimentaire et vitesse de croissance réduites à celles d'un aliment témoin (Udedibie *et al.*, 1988). Il existe encore un besoin d'informations sur les conséquences de la consommation de canavalia chez la volaille (Belmar *et al.*, 1999).

3. Systèmes d'alimentation pour l'amélioration des performances des volailles en milieu chaud

Plusieurs études ont proposé des ajustements de composition nutritionnelle (régimes alimentaires dilués ou concentrés) qui se sont révélés inefficaces pour compenser les effets négatifs de la chaleur ou inadaptés aux contextes socio-économiques. La dilution énergétique de l'aliment de ponte chez la poule pondeuse permet d'utiliser des sous-produits disponibles localement mais nécessite une granulation, augmentant ainsi les coûts de fabrication (Picard *et al.*, 1993). D'autres auteurs ont réfléchi à des stratégies nutritionnelles qui permettent de s'abstraire de la notion classique « d'aliment complet distribué *ad libitum* » et de s'adapter à la cyclicité des rythmes de consommation chez la volaille. Il s'agit d'une distribution fractionnée des apports en fonction de leurs caractéristiques nutritionnelles (Bouvarel *et al.*, 2004 ; Traineau *et al.*, 2014) ou de leur forme (Yo *et al.*, 1995 ; Umar Faruk *et al.*, 2010a).

3.1 Modalités d'apport de l'aliment

Il existe différentes modalités alternatives d'apport de l'aliment. Un retrait des aliments aux heures les plus chaudes est une pratique assez commune permettant d'alléger les problèmes de chaleur aigue par une diminution de la thermogenèse alimentaire (Sahin et Küçük, 2001). Les autres techniques de distribution alternative de l'aliment sont : l'alimentation séquentielle, l'alimentation séparée et l'alimentation mélangée. Elles sont basées sur choix plus ou moins dirigé de l'animal dans « l'espace », « le temps » ou par « tri particulière » (Noirot *et al.*, 1998). La figure 7 résume les principes de ces différentes méthodes. Leur but est d'obtenir chez les poulets des vitesses de croissance, une efficacité alimentaire et une composition corporelle, similaires à celles d'animaux consommant un aliment complet distribué en continu. Chez la poule pondeuse, le but recherché est l'obtention de performances de production (poids des œufs, taux de ponte et masse d'œufs) équivalentes à des performances d'un régime témoin distribué en continu. Le principe du choix offre selon Noirot *et al.* (1998), l'avantage d'une flexibilité dans la composition du régime, répondant à la variabilité des conditions d'ambiance.

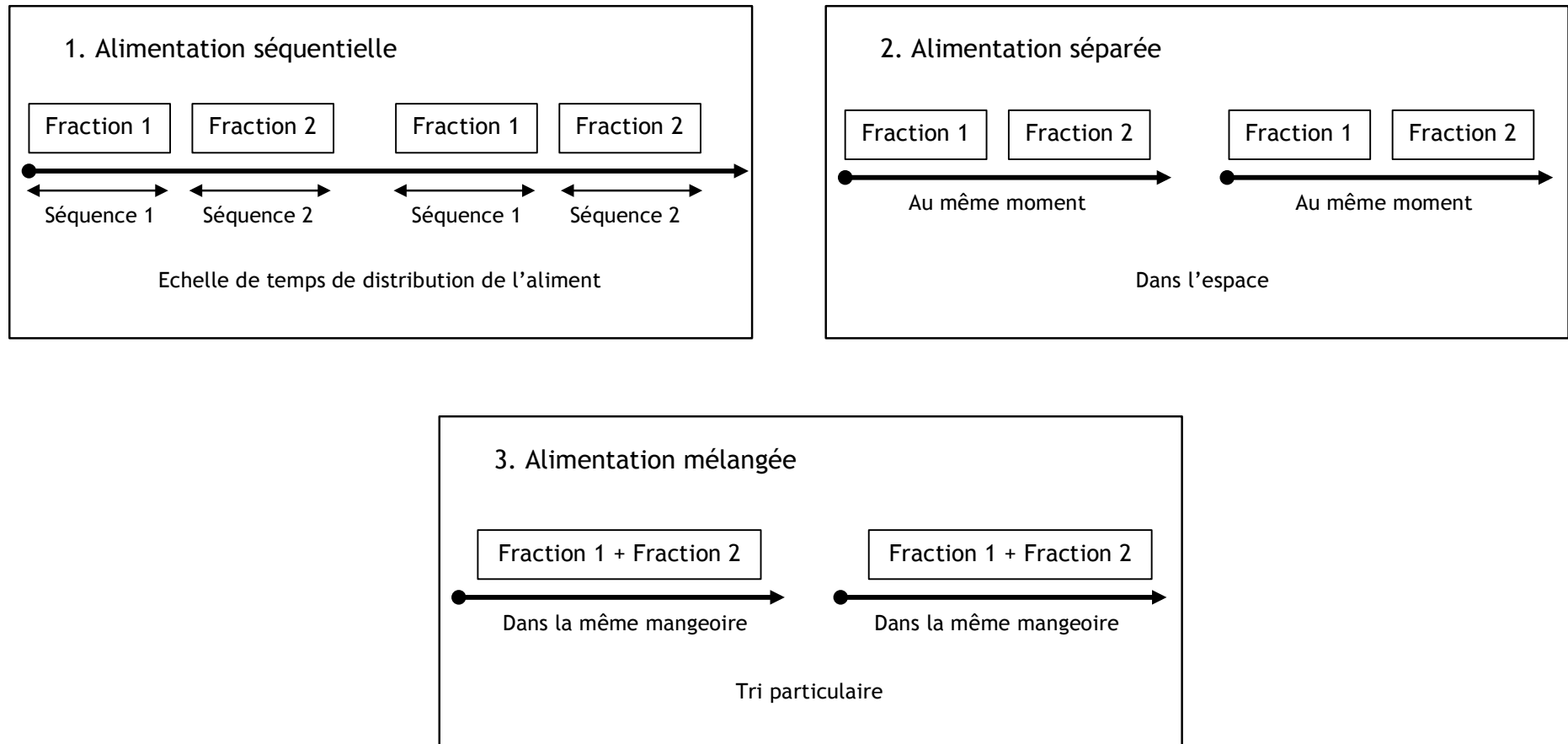


Figure 7 : Représentation schématique des principes de l'alimentation séquentielle (1), séparée (2) et mélangée (3)

Adapté de Noirod *et al.*, 1998. Les Fractions d'aliment 1 et 2 représentent des aliments ayant des caractéristiques nutritionnelles différentes et dont la combinaison sur le pas de temps considéré (12h, 24h, 48h, etc.) permet d'apporter les mêmes éléments nutritifs qu'un aliment complet distribué en *ad libitum*.

3.1.1 Principes et impacts de l'alimentation séquentielle sur les performances des volailles

L'alimentation séquentielle est une technique d'alimentation qui consiste à distribuer lors de séquences alternées dans le temps deux types d'aliments de composition nutritionnelle différente. Le principal avantage de cette méthode est la simplicité de sa mise en œuvre en pratique dans des contextes où la main d'œuvre est disponible et où l'aliment est apporté manuellement.

Plusieurs études ont évalué l'intérêt de l'alimentation séquentielle chez le poulet de chair et la poule pondeuse. Chez le poulet, Gous et du Preez (1975) ont testé la distribution de deux aliments à teneur différente en acides aminés sur des cycles de 12h et 24h. Avec des cycles de 12h, les poulets ont été capables d'ajuster leur ingestion en fonction des apports et ont démontré des performances de croissance similaires à celles des animaux recevant un aliment en continu. En revanche, pour des cycles plus allongés (24h), la croissance a été plus faible bien que l'ingestion ait été identique chez les poulets en séquentiel (Gous et du Preez, 1975). Avec des cycles de 48h, Rosebrough *et al.* (1989) ont mis en évidence une diminution de la consommation et de la croissance chez des animaux ayant reçu en alternance des aliments riches (30 %) et pauvres (12 %) en protéines. Cette baisse de performance s'expliquerait selon Rose *et al.* (1995) par une carence nutritionnelle provoquée lors de séquences supérieures à 12h. Noirot *et al.* (1998) précisent que si les séquences sont trop courtes (4 heures, par exemple), le poulet peut exprimer un rejet de l'aliment énergétique et jeûner jusqu'à la distribution de l'aliment protéique. Il semblerait donc que des séquences d'une durée intermédiaire soit préférables (Rose *et al.*, 1995). Cependant, Bouvarel *et al.* (2004) ont montré que l'allongement de la durée du cycle de 24 à 48h lors d'une distribution séquentielle d'aliments variant par leurs teneurs énergétique et protéique, favorise la consommation de l'aliment riche en protéine et pauvre en énergie, et permet d'obtenir des performances équivalentes à celles d'une alimentation complète. En faisant l'hypothèse d'une application de cette technique chez la poule pondeuse, des séquences allongées de distribution des aliments seraient difficiles à envisager au regard des rythmes de consommation observés chez cet animal qui induisent deux pics d'ingestion dans la journée. Ces pics d'ingestion seraient liés au cycle de ponte chez la poule (Chah et Moran, 1985).

Chez la poule pondeuse, les effets d'une distribution séquentielle de différentes fractions d'aliment ont été évalués en conditions environnementales tempérées. Les résultats des

travaux réalisés indiquent des réponses différentes en termes de consommation alimentaire, de production d'œufs et d'efficacité alimentaire. Blair *et al.* (1973) ont observé en milieu tempéré une augmentation de la consommation alimentaire lors d'une distribution d'une fraction céréales (constituée d'un mélange de blé entier, d'orge et de maïs broyé) le matin suivie d'un concentré de protéines l'après-midi. Néanmoins, la production d'œufs et les poids d'œufs étaient similaires à un aliment complet. *A contrario*, Robinson (1985) a observé une réduction de la production d'œufs et du poids des œufs due à une faible consommation d'aliment lorsqu'un concentré de protéines était offert dans la matinée en alternance avec un mélange d'avoine et de carbonate de calcium l'après-midi. Récemment, Umar Faruk *et al.* (2010b) et Traineau *et al.* (2013) ont démontré que l'alimentation séquentielle permet de réduire la consommation d'aliment tout en maintenant des performances de productions similaires à un aliment complet lorsque des céréales étaient alternées sur une journée avec un aliment protéique-calciq. En conditions tropicales, seule une étude de Umar Faruk *et al.* (2010a) a montré que l'utilisation de millet en alimentation séquentielle entraîne une réduction significative de la consommation alimentaire et une meilleure efficacité alimentaire qu'un aliment complet à base de maïs et soja. La réduction de l'ingestion observée en alimentation séquentielle serait le résultat d'un effet combiné de la température élevée et de la durée de l'accès au millet. L'observation du comportement alimentaire des poules indiquait une forte présence des poules à la mangeoire immédiatement après la distribution de la fraction du matin (avant une augmentation de la température). Deux heures plus tard, lorsque la température quotidienne commence à monter, seulement quelques poules étaient présentes. Par ailleurs, de faibles poids corporels et faibles vitesses de croissances ont été enregistrés chez les poules en alimentation séquentielle élevées en conditions environnementales tempérées ou chaudes (Umar Faruk *et al.*, 2010b ; Traineau *et al.*, 2013). Ces auteurs ont émis l'hypothèse que cette réduction du poids serait due à une faible consommation de la fraction énergétique et un faible dépôt de gras abdominal chez ces poules. Sachant qu'en conditions chaudes, le poids des oiseaux est déjà affecté par la température, il convient de s'interroger sur la capacité de ces animaux à produire sur une longue période et à résister à des stress divers en alimentation séquentielle.

3.1.2 Intérêts de l'alimentation en libre choix en milieu chaud

L'alimentation séparée ou alimentation en libre choix consiste à distribuer simultanément dans deux mangeoires différentes (séparées dans l'espace) un aliment énergétique et un aliment protéique afin de permettre à l'animal de se constituer spontanément un régime

optimum suivant ses besoins ou les conditions climatiques. Les résultats obtenus sont toutefois contradictoires. Certains auteurs ont montré une réduction de la consommation d'aliment chez ces animaux avec des vitesses de croissance semblables à celles obtenues avec un aliment complet (Rose et Lambie, 1986 ; Leeson et Caston, 1993). Mais, d'autres auteurs rapportent l'obtention de poids corporels plus faibles ou une plus forte teneur de gras abdominal (Scholtyssek *et al.*, 1983) chez ces poulets élevés avec un type d'alimentation séparée. En milieu chaud, Sinurat et Balnave (1986) ont démontré que les poulets de chair recevant un aliment complet ou des fractions d'énergie et de protéines séparées avaient tous un niveau d'ingestion similaire. Chez la poule pondeuse, Yo *et al.* (1995) ont conclu que les performances de ponte et les caractéristiques des œufs n'étaient pas significativement influencées par l'alimentation en libre choix. Les quantités d'aliments consommées étaient cependant, inférieures à celles des lots témoins.

Néanmoins, les résultats ont montré que ce type d'alimentation ne permet pas toujours à l'animal d'exprimer ses choix alimentaires au sens des intérêts de l'éleveur (meilleur poids de l'animal, meilleure efficacité ou encore faible engraissement). Le principal problème rencontré est celui du rapport énergie/protéines ingéré par le poulet, qui est souvent supérieur à celui observé avec l'aliment complet (Yo *et al.*, 1998). Il a été mis en évidence que la proportion d'aliment énergétique consommée était inversement liée à la teneur en protéines de l'aliment complémentaire (Noirot *et al.*, 1998). En effet, plus cet aliment est riche en azote et pauvre en énergie, plus l'aliment énergétique était consommé. Les performances de croissance ne sont pas différentes de celles du témoin, mais une surconsommation énergétique et une sous-consommation protéique entraînent une augmentation de la teneur en gras abdominal de la carcasse (Leeson et Caston, 1993). En milieu tropical, l'ingéré énergétique était réduit chez des poulets nourris de façon séparée à 33°C alors que leur ingéré protéique était maintenu constant en comparaison à des poulets en alimentation séparée à 20°C ou des poulets recevant un aliment complet (Mastika et Cumming, 1987).

L'alimentation séparée présente des avantages économiques intéressants pour l'amélioration des performances de production des volailles en milieu chaud. Toutefois, des études sont nécessaires sur : (i) l'origine des variations de choix chez le poulet qui conduisent parfois à une détérioration des résultats et (ii) une meilleure détermination de la notion d'espace relatif à occuper par chacun des deux aliments en conditions d'élevage.

3.1.3 Présentation simultanée de deux aliments dans la même mangeoire : alimentation mélangée

L'alimentation mélangée consiste en un mélange dans la même mangeoire de deux aliments différents. Le cas le plus courant est un mélange de céréales et d'un aliment complémentaire. Cette méthode a été considérée comme une modification de l'alimentation séparée et présentée comme une solution aux difficultés pratiques de l'utilisation de différents récipients en conditions d'élevage (Forbes et Covasa, 1995). Il s'agit d'une technique qui permet de réduire les coûts de fabrication et de transport. Elle permet de contrôler la composition de l'ingéré global, et de la moduler en fonction de l'âge des poulets et des performances de croissance (Noirot *et al.*, 1998). Les performances de croissance et les niveaux de consommation observés chez des poulets nourris avec un mélange de blé entier et d'un aliment complémentaire sont équivalents à ceux obtenus avec un aliment complet unique (Rose *et al.*, 1995). Chez la poule pondeuse, Cumming (1984) a comparé un aliment complet à un mélange de blé entier et un concentré de protéines. À 11 mois d'âge, le blé entier a été remplacé par du sorgho. Les résultats indiquent que la consommation alimentaire et la production d'œufs des poules nourries en alimentation mélangée étaient plus élevées que les performances des poules recevant un aliment complet (Cumming, 1984). D'autres études ont observé une production d'œufs et une masse d'œufs équivalentes entre des lots de poules recevant un aliment complet et d'autres lots nourris avec un mélange d'aliment protéique et du blé (Umar Faruk *et al.*, 2010b) ou du millet (Umar Faruk *et al.*, 2010a) en graines entières en conditions environnementales tempérées ou chaudes.

Cependant, les animaux en alimentation mélangée peuvent opérer un tri particulier qui représente un facteur limitant les performances (Chevalier *et al.*, 2007). Ce phénomène de tri particulier observé peut entraîner une augmentation de la variabilité individuelle des performances (Picard *et al.*, 1997). Picard *et al.*, (2000) ont également montré que la vitesse d'ingestion du poulet était influencée par la taille des particules et par la dureté de l'aliment. Toutefois, cette méthode peut présenter des avantages biologiques et économiques intéressants dans des conditions tropicales où les matières premières sont parfois produites par les éleveurs et peuvent donc être directement incorporées dans l'alimentation de la volaille.

3.2 Distribution de céréales entières ou broyées dans l'alimentation des volailles

Le transport et le stockage des graines, la fabrication et la conservation des aliments posent selon Picard *et al.* (1993), plus de problèmes que l'équilibre nutritionnel des rations. Ainsi, l'utilisation des céréales entières en alimentation des volailles en milieu chaud permet de surmonter les difficultés rencontrées dans certains pays chauds où la priorité est d'éviter le gaspillage des matières premières souvent importées et dont les prix varient largement.

Les céréales entières ont été offertes via les systèmes d'alimentation précédemment présentés et ont permis d'obtenir des performances similaires, voire meilleures à celles d'un aliment farineux (Chevalier *et al.*, 2007 ; Noirod *et al.*, 1998). Yo *et al.* (1997) ont montré qu'un apport de graines entières de maïs en alimentation séparée induisait une plus forte consommation de celui-ci qu'un apport sous forme concassée ou farineuse. Cette capacité à consommer des céréales entières est liée au système digestif de la volaille. Le poulet digère aussi bien les céréales entières que broyées. Il est capable de s'adapter rapidement à un régime comportant une céréale entière, en modifiant son comportement alimentaire (Noirod *et al.*, 1998). Les céréales entières induisent un développement du proventricule, du gésier et du pancréas, ainsi qu'une modification du tube digestif qui auraient des incidences positives sur la digestion et l'utilisation des nutriments (Gabriel *et al.*, 2003). Umar Faruk *et al.* (2011) ont conclu qu'avec du blé entier, le poids des œufs et le poids vif étaient améliorés chez des poules pondeuses en alimentation séquentielle comparé à du blé broyé. Une amélioration de la digestibilité iléale (Hetland *et al.*, 2002) et de l'énergie métabolisable apparente (Preston *et al.*, 2000) a également été observée chez des poulets ayant reçu blé entier.

Les volailles expriment une préférence pour certaines céréales. Karunajeewa (1978) a mis en évidence une préférence des poules pour du triticales entier (+ 17,6% d'ingestion de plus par jour) lorsqu'il est comparé au blé entier, ou à un mélange de blé/triticales ou blé/avoine en alimentation séquentielle. Bien que, cette préférence soit difficilement mesurable, elle serait selon Kempster (1916) liée à la forme de présentation, la palatabilité et les conséquences métaboliques ou encore une combinaison de tous ces facteurs. Néanmoins, le type de céréale (blé, maïs ou sorgho) n'a aucun effet sur les performances de production mais plutôt sur la consommation de l'aliment complémentaire, affectant ainsi l'utilisation des nutriments (Forbes et Covasa, 1995).

4. Conclusions de l'étude bibliographique et objectifs de la thèse

La dynamique de croissance de la production d'œufs et de poulet observée en particulier dans les pays du sud a suscité l'intérêt de mettre en place des systèmes d'alimentation permettant de mieux valoriser des matières premières alternatives et d'améliorer l'adéquation des apports aux animaux en fonction de leurs lois de réponse. Au regard de la littérature disponible, il existe différents moyens pour répondre aux enjeux de compétitivité des filières avicoles en milieu chaud, notamment l'utilisation de matières premières alternatives et de systèmes variés de distribution de l'aliment.

Les résultats obtenus pour l'alimentation séparée sont contradictoires et nécessitent des ajustements élaborés pour la compréhension des choix alimentaires par l'animal. Les systèmes d'alimentation séquentielle et mélangée ont été rapportés comme étant plus économiques et efficaces (faible consommation journalière, meilleure efficacité alimentaire, etc.), notamment dans les pays où le coût de transport et de transformation des matières premières est élevé. Cependant, ces systèmes ne sont que faiblement utilisés en milieu chaud. Par ailleurs, les études précédentes ont montré une faible consommation de la fraction énergétique et un poids vif plus faible chez les poules nourries de façon séquentielle. Il convient alors de s'interroger sur l'applicabilité de ces techniques d'alimentation dans des systèmes d'élevage en régions chaudes. Les poules en alimentation séquentielle ou mélangée sont-elles capables de produire de façon adéquate dans un environnement où elles sont soumises à des variations climatiques ? Ces études ont été réalisées en apportant du blé le matin et un aliment protéique l'après-midi. Or, le maïs est la céréale la plus utilisée en aliment des volailles en milieu chaud. Dans une optique de valorisation des matières premières locales, il paraît nécessaire d'apporter une certaine souplesse et une flexibilité à ces systèmes par l'utilisation de matières premières classiques comme le maïs.

L'aviculture tropicale est également dépendante dans certains pays des importations de matières premières. Au regard de la volatilité des prix de matières premières, il semble nécessaire de mettre en place des systèmes d'alimentation dans lesquels les matières premières produites dans les pays chauds peuvent être valorisées directement, permettant de

renforcer les liens entre filières avicole et végétale et de contribuer à leur développement. Plusieurs matières premières sont proposées dans la littérature comme des substituts appropriés au maïs et au soja. Cependant, il faut encore résoudre la problématique de l'approvisionnement en ces matières premières alternatives. Parmi les alternatives décrites dans la littérature, nous avons choisi de nous concentrer sur des matières premières réellement disponibles et bien étudiées. Il s'agit du millet et du sorgho pour les céréales et du tourteau de coton comme source de protéines. Les résultats observés peuvent être toutefois contradictoires d'un essai à l'autre. Il paraît par conséquent nécessaire d'uniformiser les connaissances sur ces matières premières afin de favoriser leur utilisation en pratique. En outre, les évaluations de matières premières réalisées dans les publications portent le plus souvent sur des substitutions simples, et ne reflètent pas forcément des conditions « réelles » avec des alternatives qui combinent plusieurs ressources. Il reste encore à évaluer les réponses qui pourraient découler d'une combinaison de ces matières premières dans l'aliment de la volaille. Connaître les impacts de l'utilisation simultanée de ces ingrédients pourrait augmenter la flexibilité des producteurs d'aliments et les éleveurs de volaille dans l'utilisation de ces ingrédients.

Les objectifs de cette thèse sont donc d'étudier les voies d'amélioration des filières avicoles en milieu chaud. Nous avons choisi de mener des études à la fois chez la poule pondeuse et le poulet de chair comme sources de protéines animales à moindre coût. Des enquêtes ont été réalisées chez la poule pondeuse pour évaluer dans un environnement tropical les enjeux réels se posant aux filières avicoles (*Chapitre 1*). Une base de données constituée pour la poule pondeuse a permis de montrer que très peu d'études, pouvant justifier l'intérêt d'une méta-analyse, ont été publiées sur l'utilisation du sorgho (3 essais), du millet (9 essais) et du tourteau de coton (2 essais). Nous avons donc fait le choix de poursuivre les travaux chez le poulet de chair afin de dégager des lois de réponse globales sur l'utilisation de ces matières premières (*Méta-analyse, Chapitre 2*). À l'issue de ces travaux, des expérimentations ont été menées pour valider *in vivo* les conclusions statistiques émises sur les matières premières chez le poulet de chair et mettre ou non en évidence une absence d'interactions entre ces matières premières (*Expérimentations, Chapitre 2*). Chez la poule pondeuse, des expérimentations ont été réalisées en conditions contrastées (conditions tempérées ou tropicales) pour améliorer la compréhension des phénomènes biologiques expliquant les performances de production obtenues avec des systèmes d'alimentation séquentielle et mélangée en milieu chaud

(*Chapitre 3*). Les résultats obtenus dans cette étude seront ensuite considérés dans une discussion générale et les perspectives présentées.

Deuxième partie :

Résultats

Chapitre 1 : Leviers d'actions pour le développement des filières de poules pondeuses en milieu chaud

Batonon DI, Bastianelli D, Chrysostome CAAM, Duteurtre G and Lescoat P. La filière de production d'œufs au Bénin : sécurisation des flux d'approvisionnement en matières premières et de commercialisation des produits. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, soumis.

Publication 1

Ce chapitre décrit l'étude *d'une filière de production d'œufs* réalisée au Bénin. Il s'agit d'un exemple concret des enjeux liés à la production avicole dans un pays chaud. Cette étude¹ a pour but de comprendre les mécanismes sous-tendant l'organisation et la structuration d'une filière tropicale et les stratégies mises en place par les acteurs pour faire face aux enjeux du marché.

Les résultats ont mis en évidence que l'augmentation de la demande locale et l'arrêt des importations des œufs réfrigérés avaient été les deux principales forces motrices ayant favorisé le développement de cette filière. Les transformations induites ont favorisé une meilleure implication de l'Etat dans le développement de la filière, entraîné un début de structuration par le regroupement de plusieurs acteurs en associations et en interprofession, contribué à l'augmentation des cheptels et à l'apparition de nouveaux acteurs. Cette étude a également identifié des leviers de développement de la filière comme l'alimentation, l'approvisionnement en poussins et la maîtrise des circuits de distribution des produits. Ce travail a conforté les choix expérimentaux de la thèse concernant l'étude de l'alimentation des volailles en milieu chaud, garantissant une flexibilité dans les matières premières utilisées et la diversification des modes de distribution de l'aliment en production avicole.

Ce travail a fait l'objet d'une communication orale à *The International Congress on Advancements in Poultry Production in the Middle East and African States* en 2013.

¹ Ce travail a été soumis dans la *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*.

Sécurisation des flux d'approvisionnement en matières premières et de mise en marché des produits dans le secteur avicole : cas de la filière œufs au Bénin

Securing of the flows of feed ingredients supplies and commercialization of products in the poultry sector flows: the case of the egg value chain in Benin

Batonon D. I.^{1,2}, Bastianelli D³, Chrysostome C. A. A. M.², Duteurtre G.⁴, Lescoat P.^{1,5}

¹ INRA, UR83 Recherches avicoles, Nouzilly, F-37380 France

² UAC-FSA, Laboratoire de Recherches Avicoles et de Zoo-Economie, Abomey-Calavi, Bénin

³ CIRAD, UMR SELMET, Baillarguet TA C-112/A, 34398 Montpellier cedex 05 - France

⁴ CIRAD, UMR SELMET, S/C Direction Régionale du CIRAD, 298 Kim Ma, Hanoi - Vietnam

⁵ AgroParisTech, UMR 1048 SADAPT, F-75005 Paris, France

Titre courant : La filière œufs au Bénin

Running title: The egg value chain in Benin

Correspondance à : Dolores I. Batonon. E-mail : dolores.batonon@gmail.com

Résumé

Dans un contexte d'augmentation mondiale de la demande en produits avicoles et de fluctuation des prix de matières premières, il paraît important de comprendre les dynamiques de structuration d'une filière avicole tropicale et les stratégies mises en place par les acteurs pour sécuriser leurs approvisionnements. Cette étude présente le cas de la filière œufs béninoise. Des entretiens semi-dirigés ont été réalisés auprès des éleveurs de poules pondeuses et des acteurs de l'amont, de l'aval et des structures d'appui et de régulation de la filière. Ces entretiens ont permis de mieux comprendre l'organisation et le fonctionnement de la filière. Les résultats ont montré qu'en amont, la production d'œufs au Bénin est dépendante des fluctuations de prix et de la faible disponibilité des matières premières sur les marchés domestiques pour l'alimentation des animaux. En aval, les éleveurs et commerçants sont confrontés à une irrégularité des besoins déconnectée des cycles de production. Des organisations professionnelles ont été créées au niveau de tous les maillons de la filière. Des stratégies ont été adoptées par les différents acteurs en termes d'approvisionnement en animaux vivants et d'écoulement des œufs via des circuits parallèles ou informels. Toutefois, l'amélioration de la productivité ne peut être garantie que si les débouchés sont maîtrisés. La création d'une centrale d'achat et de distribution des œufs pourrait favoriser un approvisionnement continu et équilibré des marchés, mais

les mécanismes sous-jacents sont à déterminer. Les résultats de cette étude soulignent l'intérêt des systèmes d'alimentation alternatifs offrant plus de souplesse dans les types d'exploitations identifiés.

Mots-clés : filière avicole, organisation, approvisionnement, commercialisation, Afrique de l'Ouest

Abstract:

As the world demand for poultry products is increasing and with the volatility of the costs of feed ingredients used in animal diets, it seems important to better understand (i) the dynamic of structuration of a tropical poultry value chain and (ii) the strategies used by the stakeholders to secure their raw materials supplies. A study of the Beninese egg value chain was performed. Semi-structured interviews were conducted with eggs producers and stakeholders involved in the whole value chain. The results showed that upstream, egg production in Benin was affected by the volatility of the costs of the feed ingredients (corn and soybean) and by the low availability of these ingredients on the local markets. Therefore, this study highlighted the importance of offering alternative feeding systems to enhance the flexibility and the competitiveness of the types of farms identified. Downstream, the market was characterized by a cyclical demand that is not connected to the dynamic of production. Professional organizations were created at every stage of the value chain to secure the flows of feed ingredients and to better control the production. The stakeholders adopted some strategies to ensure day-old chickens supplies and eggs commercialization through parallel or informal means. However, the improvement of productivity can be guaranteed only if the outlets are controlled. The creation of a center of eggs distribution may help to balance the markets supplies, but the underlying mechanisms need to be determined and well understood.

Keywords : poultry value chain, organization, supplying, commercialization, West Africa

INTRODUCTION

Dans de nombreux pays du Sud, la croissance démographique, l'urbanisation ainsi que les changements d'habitudes alimentaires ont entraîné une augmentation de la demande en produits animaux (Rae et Ngaya, 2010). Pour satisfaire cette demande, la production avicole est en plein essor, notamment dans plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest. En Côte d'Ivoire ou au Sénégal, l'accent a été mis sur la filière poulets de chair : entre 2000 et 2012, la production de viande de poulet est passée de 22 000 t à 33 800 t en Côte d'Ivoire et de 23 200 t à 56 700 t au Sénégal (FAOSTAT, 2014). Ce développement a notamment été facilité par la présence de couvoirs fournissant des poussins d'un jour à des prix

raisonnables (Bastianelli, 2001). Au Burkina Faso et au Bénin, la production d'œufs a presque doublé entre 2000 et 2012 pour approvisionner les marchés urbains : au Bénin, elle est passée de 7 200 t à 11 550 t tandis qu'au Burkina Faso, elle a augmenté de 39 350 t à 59 500 t en 2012 (Onibon et Sodegla, 2006 ; FAOSTAT, 2014).

Cependant, il subsiste de fortes interrogations sur la capacité de l'élevage avicole dans ces pays à répondre à une demande locale toujours croissante. En effet, l'augmentation rapide de la production génère une poussée soudaine de la demande en intrants vétérinaires, en bâtiments, en poussins d'un jour mais aussi et surtout en matières premières agricoles pour l'alimentation des animaux. Or, les marchés de produits agricoles de base en Afrique de l'Ouest sont caractérisés par une double instabilité intra-annuelle et inter-annuelle générée en particulier par les niveaux de production régionaux et les fluctuations des prix internationaux (Diallo *et al.*, 2011 ; Soule, 2013). Ces variations peuvent atteindre des amplitudes qui dépassent 50 % du prix à la récolte (Soule, 2013). Depuis 2007, les prix de matières premières agricoles, notamment des céréales et des sources de protéines ont largement fluctué sur les marchés internationaux (FAOSTAT, 2014). Ces variations ont affecté les prix sur les marchés domestiques, avec une variabilité des prix plus forte dans les pays côtiers (Bénin, Côte d'Ivoire, Sénégal) que dans les pays continentaux, tout au moins pour le maïs (Diallo *et al.*, 2011). Face à ces fluctuations, certains pays comme le Sénégal et la Côte d'Ivoire ont mis en place des politiques de sécurisation des approvisionnements de matières premières pour l'alimentation animale en s'orientant vers une importation de céréales des pays de la sous-région, comme le Mali ou le Burkina Faso (Diallo *et al.*, 2011). Le Bénin pourrait jouer lui aussi un rôle dans la réponse à cette demande pour l'alimentation animale dans la mesure où le pays dispose de zones agro-écologiques favorables à la production de matières premières agricoles comme le maïs et le soja (Soule, 2013). Il faut aussi bien sûr compter sur la disponibilité locale en tourteaux d'arachide et en tourteaux de coton qui comptent respectivement pour 2,5 et 1 Mt pour le seul espace UEMOA, ainsi que sur la disponibilité en sons de céréales. Enfin, la réponse à la demande en produits de base des fabricants d'aliments passe par des importations massives. Entre 1989 et 2009, par exemple, les importations de maïs ouest africaines sont passées de 56.000 à 318.000 t (FAO, 2014 ; FAOSTAT, 2014).

Au Bénin, la production avicole est encore assez faible comparativement aux pays avoisinants (Burkina Faso, Sénégal) et la consommation d'œufs et d'ovoproduits (0,80 kg/an) est bien en deçà de la moyenne mondiale (8,90 kg/an, FAOSTAT, 2014). Les perspectives de développement du marché sont donc importantes. Cependant, pour anticiper l'avenir des filières avicoles béninoises, il convient de s'interroger sur leur compétitivité par rapport aux filières avoisinantes et des importations, comme celles du

venant du Brésil ou d'Europe. La compétitivité est définie comme la capacité de ces filières agroalimentaires à maintenir et développer ses parts sur le marché national ou à l'export dans un environnement concurrentiel (Porter, 1990).

Par ailleurs, les enjeux de sécurité alimentaire dans les pays du Sud portent sur la production mais également sur la distribution et l'accessibilité aux produits par les populations à faible revenu (Foley *et al.*, 2011). Les mesures prises dans les pays ouest africains pour pallier les instabilités de prix des produits agricoles ont mis l'accent sur l'amont de la production avicole alors que l'aval de la production joue un rôle aussi important pour la stabilisation des prix (Diallo *et al.*, 2011). Selon Griffon *et al.* (2001), les marchés agro-alimentaires en Afrique sont caractérisés par des problèmes d'incertitudes notamment l'importance des asymétries de pouvoir sur les marchés, l'instabilité des prix, les problèmes d'équité dans la fixation des prix, la rigidité de l'offre qui oblige les producteurs à vendre à des échéances particulières. Ces incertitudes semblent être compensées par des formes sociales de coordination très variées qui participent au fonctionnement des filières de production et garantissent leur pérennité (Griffon *et al.*, 2001). Comment s'organise alors une filière avicole tropicale comme celle du Bénin pour faire face aux enjeux régionaux de sécurité alimentaire ? Quel est le mode de fonctionnement des exploitations avicoles au Bénin ? Quelles sont les exigences et nécessités existant en termes d'approvisionnement en intrants et de commercialisation des produits ? Quelles sont les stratégies mises en place par ces derniers pour sécuriser les flux à l'amont et à l'aval de la production afin de répondre au mieux aux besoins du marché ?

Pour répondre à ces interrogations, le concept de filière a été utilisé comme outil d'analyse (Raikes *et al.*, 2000 ; Rastoin *et Ghersi*, 2010). Dans un premier temps, une caractérisation des différents acteurs de la filière et la description de leurs modes de fonctionnement et d'organisation ont été réalisées. Ensuite, les nécessités et perspectives existant au niveau des approvisionnements et de la diffusion des produits ont été présentées. Enfin, les stratégies mises en place par les différents acteurs de la filière pour assurer la sécurisation des flux d'approvisionnements et de mise en marché ont été discutées et des scénarios d'évolution proposés.

MATERIELS ET METHODES

Concept de filière

La filière peut être définie comme « une succession d'activités étroitement imbriquées les unes par rapport aux autres, liées verticalement à un même produit ou à des produits voisins et dont l'objectif principal, dans les filières agro-alimentaires, est de répondre aux besoins des consommateurs » (Montigaud, 1989). L'approche filière adoptée dans cette

étude s'inscrit dans une logique d'analyse des flux de produits en amont et en aval de la production et permet de comprendre l'organisation et le fonctionnement des circuits commerciaux (Duteurtre *et al.*, 2000 ; Raikes *et al.*, 2000). Il s'agit d'une approche héritée de l'économie industrielle, très proche de la notion anglo-saxonne de « chaîne de valeur » (*value chain*) et qui permet une analyse très fine des relations entre acteurs (Kaplinsky et Morris, 2001). La notion de filière revêt non seulement une dimension technique mais aussi économique et territoriale (Lossouarn, 2003). La dimension économique doit être appréhendée dans ses composantes financière (niveaux de prix et de marges), marketing (qualité et segmentation des marchés) et organisationnelle (institutions) (Duteurtre *et al.*, 2000). Le fonctionnement de la filière peut être abordé de l'amont vers l'aval (on part alors de la matière première pour aboutir aux produits commercialisés au consommateur final) ou bien de l'aval vers l'amont (on part alors du marché pour remonter vers les fournisseurs de matières premières) (Rastoin et Gherzi, 2010). S'appuyant sur des méthodes utilisées pour analyser les filières avicoles européennes, brésiliennes (Bonaudo *et al.*, 2011) et ouest-africaines (Bastianelli, 2001 ; Djamen, 2008), l'étude a été réalisée en partant du système de production d'œufs pour identifier en amont les circuits d'approvisionnement en intrants, et en aval les circuits de transport et de distribution des produits.

Délimitation de la filière avicole béninoise et des territoires associés

Il existe au Bénin deux types d'aviculture. L'aviculture rurale (parfois qualifiée de « traditionnelle ») est caractérisée par un élevage en divagation ou en semi-divagation dont les produits sont destinés à l'autoconsommation et parfois à la vente. En aviculture rurale, les exploitations utilisent la plupart du temps des ressources génétiques locales et des aliments disponibles localement sur l'exploitation. D'un autre côté, l'aviculture intensive (parfois qualifiée de « moderne » ou de (semi-)industrielle) est caractérisée par un élevage est caractérisée par un élevage à orientation commerciale utilisant des techniques d'élevage plus intensives, incluant notamment des souches améliorées, des bâtiments fermés, et des rations à base d'aliments industriels. Au sein de ces 2 types d'aviculture, il peut exister une grande diversité de modèles techniques et de formes d'exploitation. Par extension, nous parlerons de « filière semi-industrielle » (ou même de « filière industrielle ») pour caractériser les circuits amont et aval dans lesquels s'insèrent les exploitations semi-industrielles. Cette filière s'est développée essentiellement à proximité des grands centres de consommation du sud du pays (TDH, 2010).

La présente étude s'intéresse à la filière semi-industrielle de production et de commercialisation des œufs au Bénin, qui présente le plus de potentialités pour

approvisionner le marché de masse béninois dans les années à venir. L'étude a consisté dans un premier temps à identifier les types d'acteurs impliqués sur le territoire concerné. En amont de la production, nous nous sommes intéressés aux acteurs chargés de la production et de la commercialisation de matières premières utilisés dans la fabrication d'aliments, aux fournisseurs d'animaux vivants, aux fournisseurs d'additifs alimentaires, aux fabricants d'aliments, aux fournisseurs de produits vétérinaires et aux prestataires de services vétérinaires. En aval de la production, nous nous sommes intéressés aux acteurs chargés de la commercialisation des divers produits issus de l'élevage (œufs mais aussi poules de réforme et fientes), aux acteurs de la restauration qui sont des acheteurs importants d'œufs et aux ménages consommateurs finaux. Notre étude a aussi porté sur l'analyse des élevages eux-mêmes et sur l'analyse des acteurs ayant des fonctions de régulation et de gouvernance dans la filière tels que les services de l'élevage et les organisations professionnelles (Tableau I).

L'étude a été réalisée au sud du Bénin dans les départements de l'Atlantique, du Littoral et de l'Ouémé où se situent 75% des aviculteurs ainsi que les centres de consommation majeurs. Nous avons aussi conduit des enquêtes au Nord dans le Borgou qui est une zone de production agricole, afin de rencontrer certains des acteurs impliqués dans l'approvisionnement en matières premières. Le sud du Bénin est caractérisé par un climat subéquatorial qui alterne deux saisons sèches (de novembre à mars et de mi-juillet à mi-septembre) et saison des pluies (d'avril à mi-juillet et de mi-septembre à octobre). Le département du Borgou au nord est caractérisé par un climat de type soudanien. L'année se partage en deux saisons : une saison sèche de novembre à début mai et une saison pluvieuse de mai à octobre. Les caractéristiques climatiques et écologiques de cette zone en ont fait une zone de production agricole où l'on produit pendant la saison des pluies pour ensuite stocker et revendre pendant les périodes de rareté.

Echantillonnage et collecte des données

Une démarche en deux étapes a été adoptée : la première a privilégié la conduite d'entretiens individuels semi-dirigés auprès de différents types d'acteurs afin de mieux cerner et appréhender les contraintes et potentialités des différents acteurs du système. La seconde étape s'est attachée à conduire des enquêtes plus systématiques auprès des éleveurs afin de conduire un diagnostic technique des exploitations avicoles. Cette étude a été réalisée de mars à septembre 2012.

Quatre-vingt enquêtes individuelles ont été conduites auprès de tous les acteurs impliqués dans la filière dans le but de la caractériser, de décrire les fonctions des différents acteurs, de décrire les flux de matières premières et produits et de comprendre

Tableau I

Acteurs enquêtés et répartition dans la zone d'étude

Acteurs enquêtés	Effectif	Localisation
Acteurs transversaux		
Structures du gouvernement	3	Littoral
Organisations professionnelles	5	Atlantique - Littoral
Acteurs en amont de la production		
Producteurs de matières premières	6	Borgou
Usines de transformations de matières premières agricoles	2	Littoral
Commerçants de matières premières	6	Zone d'étude ¹
Couvoirs et importateurs de poussins	3	Atlantique
Fournisseur d'additifs	1	Littoral
Fabricants d'aliments	4	Atlantique - Littoral
Importateurs produits vétérinaires	2	Littoral
Prestataires de services vétérinaires	2	Atlantique - Littoral
Eleveurs de poules pondeuses	30	Sud-Bénin ²
Acteurs en aval de la production		
Commerçants œufs	4	Littoral-Ouémé
Commerçants poules	2	Littoral
Restaurants - Cafétérias	2	Littoral
Superettes - Pâtisseries	2	Littoral
Consommateurs	6	Littoral-Ouémé
Total	80	

¹ Zone d'étude : Atlantique - Littoral - Ouémé - Borgou² Sud-Bénin : Atlantique - Littoral - Ouémé

les relations entre ces différents acteurs (Tableau I). L'échantillonnage des acteurs impliqués dans cette phase a été réalisé en collaboration avec l'Union Nationale des Aviculteurs Professionnels du Bénin (UNAP-Bénin) et de manière concertée avec les responsables des diverses associations d'acteurs. Plusieurs niveaux d'investigation ont été privilégiés et adaptés pour chaque type d'acteurs : la description des activités menées (activité de production, transformation, pratiques d'alimentation, etc.) ; la description des flux de matières et produits (circuits d'approvisionnements et de commercialisation formels et parallèles) ; les relations avec les autres acteurs de la filière (type d'acteurs et nature des relations) ; les logiques individuelles et collectives des acteurs (comportements face à une crise, alternatives à l'évolution de la demande) et les difficultés rencontrées et solutions envisagées. Afin de comprendre le fonctionnement du système productif et de caractériser ses performances techniques et économiques, des suivis d'élevage ont été réalisés auprès de quelques exploitations. Ces exploitations étaient localisées dans le Sud du Bénin. Les données ont été collectées à l'aide de questionnaires structurés portant sur la conduite des animaux.

Traitement des données

Une analyse du fonctionnement de la filière a été réalisée en caractérisant les flux mis en œuvre par chaque famille d'acteurs et en rendant compte des stratégies développées, des relations spécifiques qui s'établissent dans la filière et conditionnent son développement. Les facteurs de changements et les différentes contraintes qui ont contribué à l'évolution de la filière ont été identifiés.

Pour caractériser les systèmes d'élevage, toutes les variables issues des enquêtes systématiques ont été préalablement codifiées et les données soumises à une analyse factorielle de correspondances multiples (AFCM) sous *R version 3.0.2* (R Core Team, 2013). Sur les 30 éleveurs enquêtés, 29 questionnaires étaient exploitables. Une analyse préliminaire a montré qu'un éleveur se distinguait de tous les autres en raison de la taille et du fonctionnement de son exploitation. Une seconde AFCM a donc été réalisée en écartant cet individu du groupe afin de mieux comprendre les dynamiques au sein des 28 éleveurs restants. Au terme de cette AFCM, une classification ascendante hiérarchique (CAH) a ensuite été réalisée permettant d'aboutir à une typologie (Husson *et al.*, 2009).

RESULTATS

Les informations apportées dans cette section sont issues des enquêtes, sauf indication contraire.

La filière de production d'œufs au Bénin

Les éleveurs de poules pondeuses s'approvisionnaient en divers intrants auprès d'acteurs situés pour une partie hors de la zone d'étude. Ils réalisaient les opérations techniques suivantes : élevage de poulettes, suivi des pondeuses, alimentation et soins aux poules, ramassage des œufs. La vente des œufs se faisait soit directement du producteur au consommateur, soit par l'intermédiaire d'un ensemble d'acteurs spécialisés. La figure 1 donne une représentation des différentes familles d'acteurs intervenant à différentes étapes de la filière œufs. La figure mentionne trois types d'élevage (type 1, type 2 et type 3) et un éleveur « industriel », qui sont décrits plus bas dans le paragraphe présentant les résultats de l'AFCM. Les différents circuits de commercialisation des autres produits de l'élevage, poules de réformes et fientes sont présentés dans la figure 2.

Acteurs en amont de la production

Les éleveurs achetaient les poussins soit auprès d'un couvoir qui importait des œufs à couvrir d'Europe (Belgique, Pays-Bas), soit auprès de prestataires de services vétérinaires ayant une activité d'importation de poussins d'un jour en provenance d'Europe ou d'autres de la sous-région (Côte d'Ivoire, Ghana, Nigéria). Deux grands élevages (ayant plus de 3.000 poules) importaient eux-mêmes leurs poussins d'Europe. Certains éleveurs s'approvisionnaient également en poulettes prêtes à pondre (16 semaines). Le marché de poules à 16 semaines est apparu récemment avec la production de poulettes à destination de petits éleveurs par le plus grand élevage du pays.

Treize (13) des élevages enquêtés assuraient eux-mêmes la fabrication d'aliments. Ces éleveurs achetaient les matières premières auprès de commerçants grossistes ou détaillants et les transformaient dans des unités dédiées. La production d'aliments à la ferme s'observait dans les élevages installés depuis plusieurs années (avant 2000). Ces unités de production d'aliment ont été mises en place alors qu'il n'existait pas encore d'unités industrielles de fabrication d'aliments industriels de fabrication d'aliments : « *Au moment où j'ai installé mon exploitation, il n'y avait pas de fabricants d'aliments spécialistes. Ceux qui se disaient fabricants d'aliments n'avaient aucune formation et mélangeaient juste des matières premières* » (Eleveur n°4). Les aliments étaient également fabriqués par des éleveurs qui jugeaient que les aliments disponibles dans le commerce était de qualité moindre : « *J'ai utilisé une fois l'aliment fabriqué par le plus grand fabricant d'aliments mais j'ai eu des pertes énormes et j'ai décidé de recommencer à formuler et fabriquer moi-même l'aliment* » (Eleveur n°2) ; « *On veut savoir ce qu'ils*

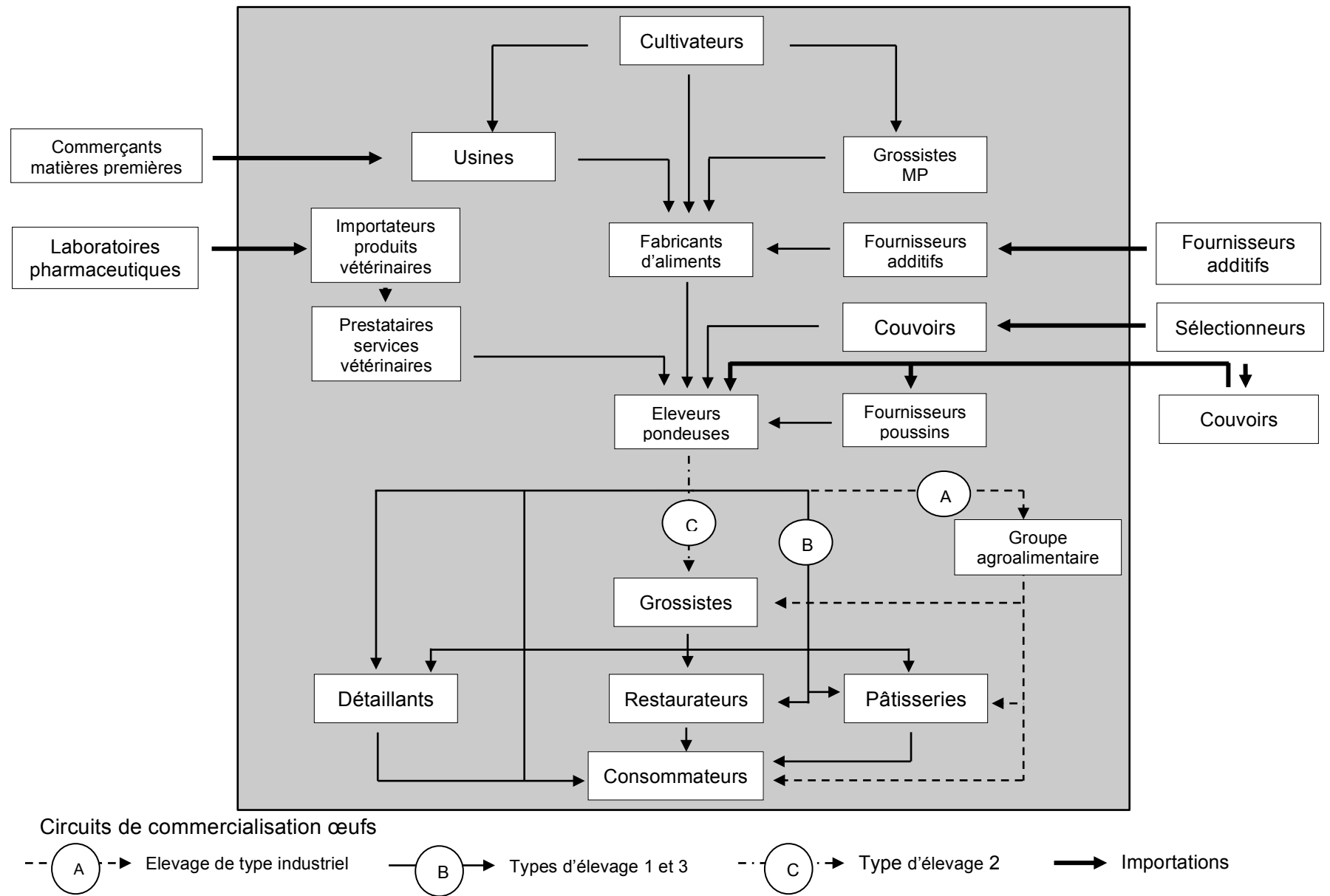


Figure 1 : Organisation de la filière œuf au Bénin montrant les circuits d'approvisionnement en matières premières et de commercialisation des œufs

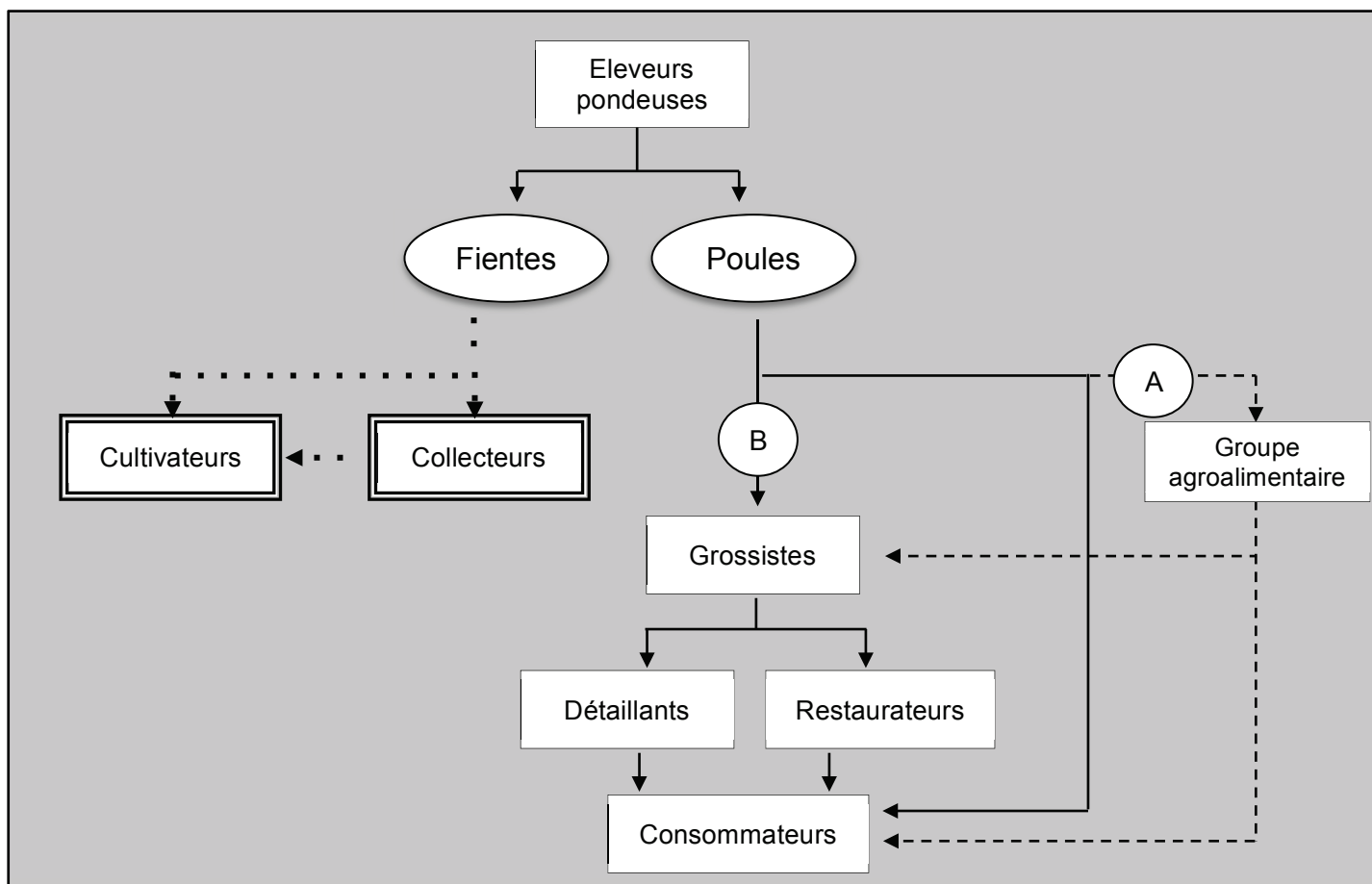
mettent exactement dans l'aliment et pas juste les teneurs en nutriments » (Eleveur n°23).

Les autres éleveurs (16 élevages) achetaient l'aliment auprès des fabricants d'aliments. Ils avaient également pour habitude de fabriquer leurs aliments il y a quelques années, mais ont choisi d'en acheter suite aux difficultés d'achat et de transport des matières premières : *« C'est trop pénible de passer de marché en marché ou d'un commerçant à un autre pour trouver une matière première qui manque »* (Eleveur n°1) ou à une volonté d'amélioration du niveau technique de leurs exploitations : *« On ne peut pas être à la fois éleveur et fabricant d'aliments »* (Eleveur n°3).

Deux fabricants d'aliments produisaient des aliments commerciaux pour poules pondeuses sur le territoire. Le premier (Groupe Vêto Service S.A.) produisait 250 t d'aliments pour pondeuses par semaine tandis que le second en fournissait 8 t/semaine. Ce dernier assurait également la commercialisation de matières premières et de poussins d'un jour via son couvoir qui importe des œufs à couvrir d'Europe. Le plus grand fabricant d'aliment produisait également des aliments pour lapins, poulets de chair et ruminants (bovins, ovins, caprins) et assurait la revente de matières premières agro-industrielles achetées auprès des usines locales. Les aliments pour ruminants étaient exportés vers divers pays de la sous-région. Les autres fournisseurs d'aliments étaient en réalité des revendeurs des aliments produits par le plus grand fabricant d'aliment. Ils disposaient également d'ateliers pour la mouture des matières premières utilisés par les éleveurs qui fabriquent les aliments utilisés sur leurs exploitations. Pour limiter l'impact des fortes fluctuations des prix des matières premières, certains éleveurs et fabricants d'aliments planifiaient des approvisionnements conséquents en période de bas prix et stockaient ces réserves dans leurs entrepôts. Les petits producteurs qui n'avaient pas les moyens de faire des réserves restaient dépendants des fluctuations des prix sur le marché.

Les produits vétérinaires étaient importés de plusieurs pays par des opérateurs privés. L'Etat assurait la distribution exclusive des vaccins. Les additifs alimentaires étaient importés de divers pays et commercialisés par le plus grand fabricant d'aliment. Il les revendait ensuite aux ateliers de mouture d'aliments ou aux éleveurs. Cet acteur assurait également en partie l'importation et la distribution de petits matériels avicoles (mangeoires, abreuvoirs).

Les services vétérinaires étaient fournis par des techniciens en santé animale disposant rarement d'autorisation d'exercer ou par des cabinets vétérinaires plus spécialisés dans la prescription de médicaments. Ces cabinets vétérinaires fournissaient également des conseils dans la gestion et le suivi de l'exploitation, les pratiques d'alimentation et le calcul des formules de rations d'aliments pour les éleveurs qui



Circuits de commercialisation poules de réforme

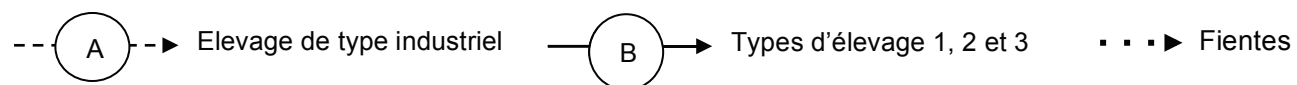


Figure 2 : Organisation de la filière œuf au Bénin montrant les circuits de commercialisation des poules de réforme et des fientes

faisaient eux-mêmes le mélange des matières premières. Avec l'augmentation de la production d'œufs, ces derniers avaient pour fonction la rédaction d'un business plan en cas d'installation de nouveaux éleveurs ou d'agrandissement de l'exploitation. Ils assuraient également le suivi des performances techniques dans les élevages sous contrat avec eux. L'usine de fabrication d'aliments (Groupe Vêto Services S.A.) a développé un service d'accompagnement et d'appui technique à destination de ses clients éleveurs. Ceci lui permettait également de collecter des informations sur l'efficacité des aliments vendus et de les adapter si besoin. D'autres éleveurs plus anciens dans le domaine mais sans formation réelle en médecine vétérinaire exerçaient également cette activité de services auprès de leurs collègues.

Système de production d'œufs

L'analyse des résultats d'enquêtes à l'aide d'une analyse factorielle des correspondances multiples (AFCM) a fait ressortir 3 types d'élevage qui se distinguent principalement par les pratiques d'alimentation et les stratégies d'approvisionnement en poussins et matières premières adoptées (Figure 3a et 3b). La caractérisation de chacun des types identifiés est présentée dans les tableaux II et III, ainsi que les données concernant l'élevage industriel.

La notion d'éleveur est définie dans cette filière comme étant les chefs d'exploitation, propriétaires de leurs animaux. Les chefs d'exploitation étaient pour la plupart des professionnels d'autres secteurs d'activité (fonctionnaires, informaticiens, retraités) en reconversion d'activité (12 éleveurs/29) ou pluriactifs (12 éleveurs/29). Ils ne s'occupaient pas toujours de l'élevage et de la conduite des animaux mais employaient de la main d'œuvre familiale ou salariale pour s'occuper de l'exploitation (Tableau II). Les autres éleveurs (5 éleveurs) étaient fils d'agriculteur ou avaient installé l'exploitation pour exécuter leur métier (formation professionnelle en aviculture). Les fonctions des chefs d'exploitation dans l'exploitation se résumaient à la gestion des approvisionnements en intrants et la commercialisation des produits.

Le financement des investissements et des avances de trésorerie provenaient de capitaux propres. Seulement sept éleveurs avaient eu partiellement recours à un emprunt auprès d'institutions de financement communal (Caisse Locale de Crédit Agricole Mutuel) pour démarrer leurs activités de production. Les banques étaient souvent jugées réticentes à l'idée de financer des activités agricoles ou d'élevage par nature relativement risquées : « *J'ai obtenu mon premier emprunt après 10 ans d'activité car j'ai pu montrer que ça fait longtemps que je suis dans le domaine* » (Eleveur n°5). Par ailleurs, l'insolvabilité de certains éleveurs avait amené les institutions de financement à durcir les conditions d'accès exigeant parfois des garanties que les plus petits éleveurs ne pouvaient pas fournir

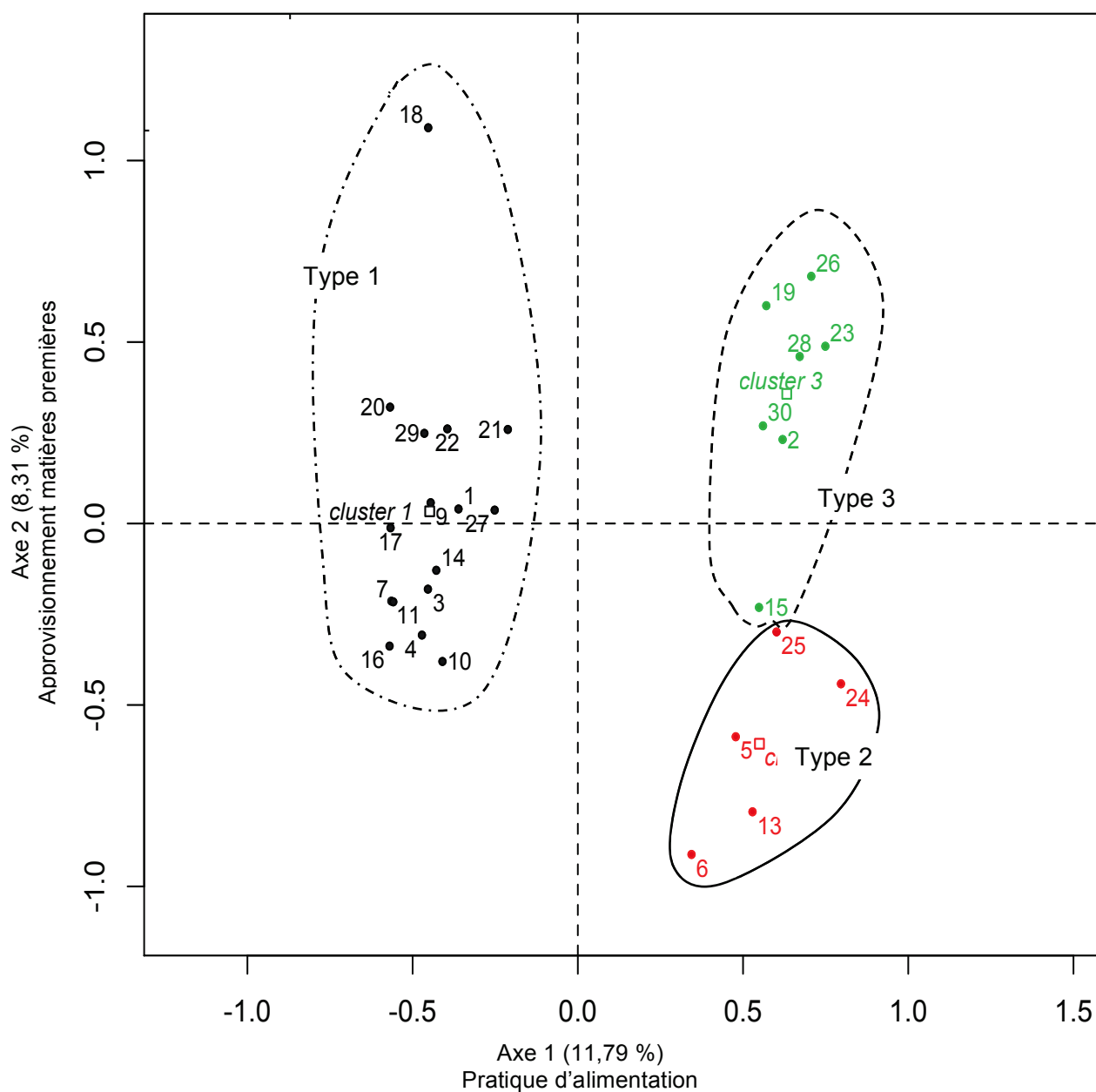


Figure 3a : Plans factoriels 1-2 de l'AFM combinant toutes les variables du système de production et les trois types d'élevage discriminés par la CAH

(titre de propriété, entreprises cautionnaires) : « *Les institutions de micro-finance avaient commencé à financer notre activité mais ils ont augmenté les conditions de financement parce que certains collègues n'ont pas pu solder leurs emprunts* » (Eleveur n°6). Les difficultés de financement étaient jugées par les chefs d'exploitation comme des limites importantes aux investissements et un frein au développement de la filière : « *Je peux investir mes fonds personnels pour agrandir l'exploitation mais si en 2015, il n'y a pas de financement extérieur, je serai obligé de limiter mon effectif à 25 000 têtes* » (Eleveur n°5).

Les techniques d'élevage employées étaient globalement les mêmes dans les différents types d'élevage à la différence des bâtiments d'élevage. Les animaux (150 000) étaient élevés en batterie dans l'élevage de type industriel et au sol pour la majorité des autres types. Ces techniques peuvent être définies comme intensives en ce sens que les animaux étaient élevés en claustration et recevaient une alimentation industrielle, leur permettant d'exprimer leur potentiel de production. Deux souches industrielles d'animaux étaient utilisées dans les exploitations : Isabrown et Harco. Alors que la souche de pondeuses Isabrown était l'une des plus utilisées (30 élevages), la poule Harco était reconnue par les utilisateurs comme étant « *l'une des souches de ponte les plus rustiques et pouvant se garder pendant 2 ans de ponte* » (Eleveurs n°10 et n°14). L'élevage se faisait souvent par bande mais la définition d'une bande dépendait du type d'exploitation considéré et surtout de la taille du cheptel. L'élevage de type industriel constituait souvent des bandes de 30 000 poules alors que la taille pouvait largement varier dans les autres types d'élevage. Dans le type 3, la taille moyenne était de 1500 poules pour les élevages moyens (cheptel de moins de 8000 animaux) alors que dans le type 1, elle était de 2 600 poules. Pour l'élevage de type industriel, l'alimentation était distribuée automatiquement via des silos d'alimentation et des chaînes de distribution et l'eau était apportée automatiquement en continu sur toute la journée. Pour les autres types d'élevage, l'aliment et l'eau étaient distribués manuellement, exigeant une forte présence de l'éleveur ou du salarié sur l'exploitation.

L'âge de réforme des animaux dépendait des méthodes commerciales de chaque élevage, de son niveau de performances et de son niveau technique. Certains éleveurs procédaient à la réforme de leurs animaux après une période de production de 52 à 64 semaines (cas de l'éleveur industriel et d'un éleveur du type 1). Les autres poursuivaient l'exploitation des animaux plus ou moins longtemps en fonction de la période de vente ciblée et de la trésorerie disponible : « *Etant donné qu'elles se vendent mal en dehors des fêtes de fin d'année, je continue parfois à les élever même lorsqu'elles ont atteint l'âge prévu de réforme* » (Eleveur n°2) ; « *On nourrit les animaux avec les recettes issues de la*

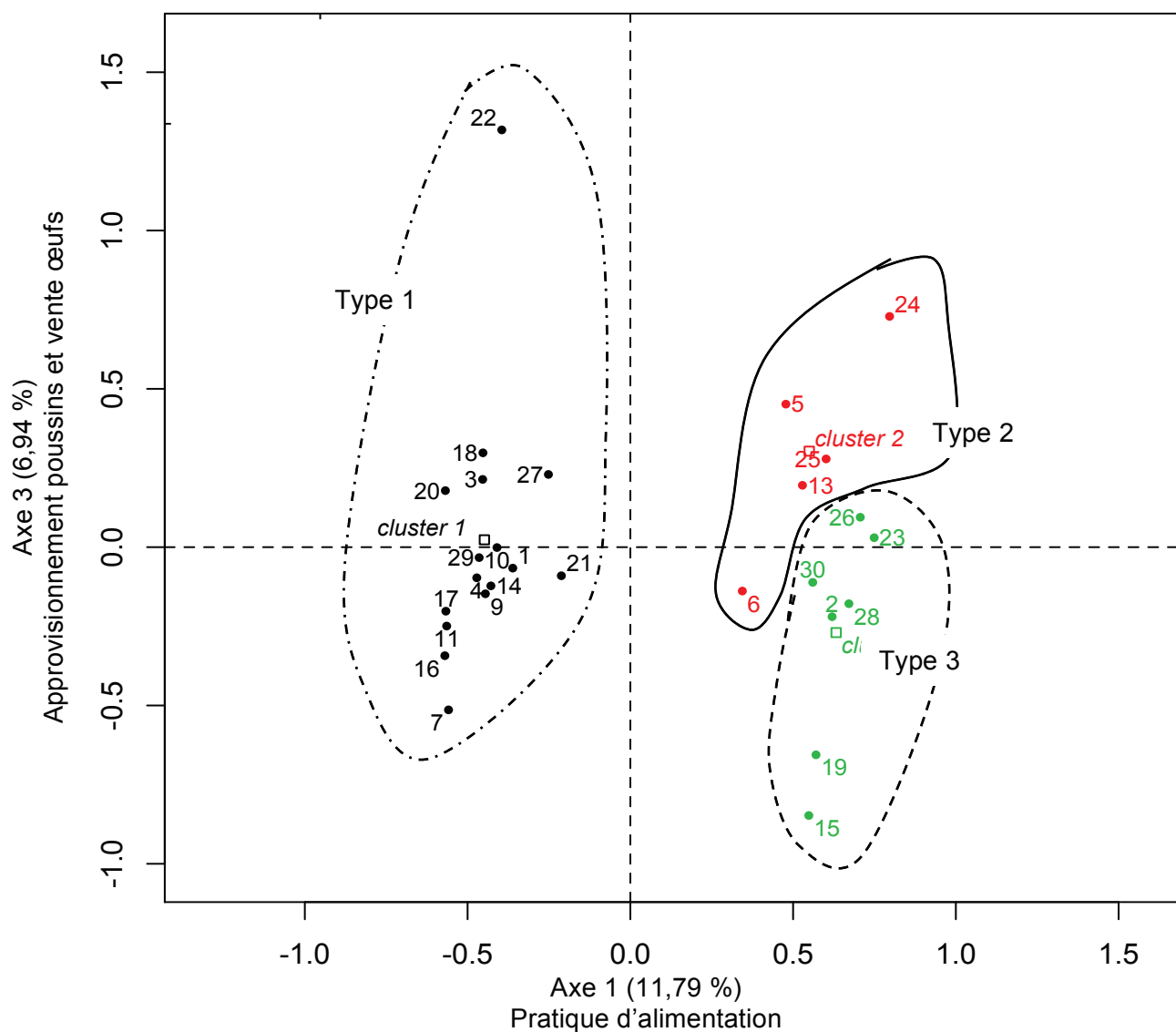


Figure 3b : Plans factoriels 1-3 de l'AFM combinant toutes les variables du système de production et les trois types d'élevage discriminés par la CAH

vente des œufs. Dès qu'on se rend compte que ce n'est plus rentable, on vend les animaux » (Eleveur n° 10).

Le tableau II résume les principales caractéristiques techniques et économiques des 3 types d'élevage identifiés.

Description des types d'élevage identifiés

Eleveur 1 : « éleveur de type industriel ». Il s'agit du plus grand élevage de pondeuses du pays (150 000 poules pondeuses) installé en zone péri-urbaine à proximité des grandes villes du sud du pays. Il importe directement ses poussins de souche industrielle de France. Les poulettes sont nourries pendant toute la phase de démarrage avec des miettes importées d'Europe. Il dispose en outre d'une usine d'aliment pour la fabrication des aliments destinés à la phase de croissance et de production. Pour assurer un approvisionnement continu de son usine, 30 % du maïs est produit sur place alors que l'autre partie est achetée directement auprès de collecteurs/grossistes dans le nord du pays. Les autres matières premières sont achetées auprès des usines (son de blé, tourteaux de soja et de coton) ou des importateurs locaux (additifs alimentaires, coquille d'huîtres). Les œufs sont commercialisés via un réseau de distribution mis en place au moyen des entreprises de son groupe agro-alimentaire. Ils sont vendus en gros (10 plateaux de 30 œufs minimum par achat) à des grossistes sous contrats, des pâtisseries ou au détail (plateau de 30, 12 ou 6 œufs) à des particuliers (Fig. 1). Les poules de réforme sont pour partie abattues sur l'exploitation et surgelées pour une vente directe au consommateur (Fig. 2). L'autre partie est commercialisée en vif aux grossistes venant majoritairement de Cotonou. Les fientes sont destinées principalement à la fertilisation des sols sur l'exploitation et les surplus vendus aux maraîchers et producteurs vivriers de la commune.

Type 1 (16 élevages) : « élevages avec une alimentation de type commercial ». Il s'agit principalement d'exploitations de petite taille (9 éleveurs ont moins de 2 000 poules). Installés pour la plupart avant 2000, ils sont situés en zone urbaine et ne disposent que de cette activité comme source de revenus. L'approvisionnement en poussins se fait via des intermédiaires locaux qui informent très peu les éleveurs de la provenance des animaux. Ils sont importés d'Europe ou des pays voisins (Ghana, Côte d'Ivoire, Nigéria) et sont élevés au sol de la phase de démarrage jusqu'à la réforme. Deux éleveurs de ce groupe s'approvisionnent en poulettes prêtes à pondre plutôt qu'en poussins d'un jour. Ceci permettrait de se soustraire de la phase de croissance des animaux (0-16 semaines) qui nécessite des investissements importants en termes de produits vétérinaires : « Avec la fourniture de poulettes à 16 semaines, cet acteur s'approprie une partie du marché des vétérinaires, la phase de croissance étant celle où les vétérinaires sont le plus sollicités ».

Tableau II

Caractéristiques techniques des types d'élevage identifiés

		Eleveur industriel	Type 1	Type 2	Type 3
Nombre d'éleveurs		1	16	5	7
Origine capital		Fonds propres	Fonds propres (14)	Fonds propres (5)	Fonds propres (6)
		Emprunt	Emprunt (3)	Emprunt (2)	Emprunt (1)
Main d'œuvre		Salariée	Salariée (11)	Salariée (5)	Salariée (5)
			Familiale (6)	Familiale (2)	Familiale (3)
Nombre de bandes		5	1,75 ± 1	2,20 ± 1	1,40
Taille moyenne d'une bande dans les élevages	Petits (< 2000)	-	470 ± 300 (9)	500 (1)	550 ± 260 (6)
	Moyens ([2000; 8000])	-	2 600 ± 1 000 (6)	2 500 ± 2 350 (4)	1 500 (1)
	Grands (≥ 30000)	30 000	7500 (1)	-	-
Age à l'arrivée des animaux		1 j	1 j (15)	1 j	1 j (6)
			16 sem. (2)		16 sem. (2)
Age à la réforme		80 sem.	> 72 sem.	> 72 sem.	> 72 sem.
Souche		Isabrown	Isabrown (16)	Isabrown (5)	Isabrown (7)
			Harco (3)	Harco (1)	Harco (1)
Mode d'élevage		Batterie	Sol (14)	Sol	Sol
			Batterie (2)		
Distribution aliment et eau		Automatisé	Manuel	Manuel	Manuel

* Le nombre d'éleveurs concernés est inscrit entre parenthèses.

Les types d'éleveurs ont été définis par une CAH basée sur l'ensemble des données collectées en enquête.

dans les exploitations » (Eleveur industriel) et favoriserait l'obtention plus rapide de ressources financières « certains investisseurs ont acheté les poulettes et vendu les œufs tout de suite » (Eleveur n°7). Les aliments destinés aux différentes phases d'élevage et de production étaient achetés auprès du plus grand fabricant d'aliment local. Les produits issus de l'élevage (œufs, poule de réforme et fientes) étaient vendus à une clientèle pas forcément fidèle (particuliers, détaillants, grossistes, cultivateurs). Ce type d'éleveurs disposait d'une très faible marge de flexibilité en période de mévente.

Type 2 (5 élevages) : « élevages de taille moyenne produisant leur propre aliment ». Ces exploitations étaient caractérisées par un élevage au sol sur litière des animaux en zone péri-urbaine. Les éleveurs de ce groupe avaient pour activité principale l'élevage de volaille mais d'autres ateliers (porcs) existaient également. L'approvisionnement en animaux vivants se faisait via des intermédiaires important les poussins d'Europe. Les animaux étaient nourris pendant toutes les phases de production par un aliment fabriqué par l'éleveur ou par des prestataires de services vétérinaires. Pour composer l'aliment, les matières premières étaient achetées en grandes quantités auprès de grossistes et stockées sur une durée déterminée n'excédant pas quelques semaines. Les éleveurs de ce groupe disposant d'exploitation de taille moyenne, commercialisaient les œufs à des grossistes (10 plateaux de 30 œufs au minimum à chaque achat). Les éleveurs étaient assurés de la fidélité de leurs clients. Les poules étaient vendues en vif en gros à des commerçants qui revendaient sur les marchés des grandes villes ou à des particuliers qui en faisaient la demande. Les fientes étaient vendues à des cultivateurs de la commune ou à des collecteurs qui revendaient à leur tour à des producteurs maraîchers ou vivriers (Tableaux II et III).

Type 3 (7 élevages) : « élevages de petite taille produisant leur propre aliment ». Six des éleveurs de ce groupe avaient pour activité principale l'élevage de volaille. L'autre éleveur était informaticien de formation et disposait de cette activité avicole comme source de revenus complémentaire. Les poussins étaient importés directement d'Europe via un intermédiaire (3 élevages concernés) ou achetés auprès d'un fournisseur local ne renseignant par forcément sur la provenance des animaux (2 élevages). Les deux autres éleveurs s'associaient à d'autres collègues éleveurs pour importer directement les poussins d'Europe. L'aliment utilisé sur l'exploitation était fabriqué par l'éleveur lui-même. Ne disposant pas de moyens de stockage et ayant de plus petits cheptels (< 2 000 poules), les éleveurs du type 2 achetaient les matières premières au fur et à mesure de leurs besoins auprès de détaillants situés à proximité de leurs exploitations. En cas de pénurie, ils achetaient plusieurs sacs qu'ils stockaient dans les ateliers dans lesquels ils faisaient la mouture de leurs ingrédients. Ces éleveurs vendaient les œufs à des grossistes mais

Tableau III

Circuits d'approvisionnement en intrants et de commercialisation des produits dans les types d'élevage

	Eleveur industriel	Type 1	Type 2	Type 3
Nombre d'éleveurs	1	16	5	7
Taille cheptel	Petits < 2000	9	1	6
	Moyens [2000; 8000]	6	4	1
	Grands ≥ 30000	1		
Localisation	Péri-urbaine	Urbaine (8)*	Péri-urbaine	Péri-urbaine (6)
Domaine principal d'activité	Agro-alimentaire	Aviculture (13) Tertiaire (3)	Elevage	Aviculture (6) Tertiaire
Origine animaux	France	Intermédiaire (7) Diverse (7) Couvoir (2)	Europe (Intermédiaire)	Europe (3) Local (2) Groupe (2)
Stratégie d'alimentation	Import / Usine d'aliment	Achat aliment	Ateliers de mouture	Ateliers de mouture
Approvisionnement matières premières	Production / Grossistes		Grossistes / Importateurs	Détaillants
Clients œufs	Circuit de distribution	Tous	Grossistes	Tous
Clients poules	Grossistes / Circuit de distribution	Grossistes / Particuliers	Grossistes Particuliers (1)	Grossistes / Particuliers
Mode de commercialisation poules	Vif / Surgelées	Vif	Vif	Vif
Commercialisation fientes	Cultivateurs / Epannage	Cultivateurs (14) Epannage (2)	Grossistes / Cultivateurs	Grossistes / Cultivateurs
Perspectives d'évolution	Augmentation	Augmentation (8)	Augmentation (2)	Augmentation (5)
	Autonomie alimentaire	Relocalisation (8)	Relocalisation (2)	Relocalisation (2)

* Le nombre d'éleveurs concernés est inscrit entre parenthèses.

Les types d'éleveurs ont été définis par une CAH basée sur l'ensemble des données collectées en enquête.

également à des particuliers situés près de l'exploitation, des pâtisseries et restaurateurs (Fig. 1). La vente à des pâtisseries et restaurateurs présentait l'intérêt d'une régularité et d'un écoulement d'œufs cassés/fissurés. Les poules étaient vendues en vif à des grossistes ou des particuliers. Les fientes étaient vendues à des cultivateurs de la commune ou à des collecteurs qui revendaient à leur tour à des producteurs maraîchers ou vivriers (Fig. 2).

Acteurs en aval de la production

La chaîne de commercialisation des œufs et des poules de réforme se faisait soit par la vente directe aux consommateurs, soit par la vente à plusieurs maillons intermédiaires. Ces derniers étaient spécialisés (grossiste œuf, grossiste poules) ou exerçaient plusieurs activités en dehors de la filière (pâtisseries, restaurateurs, détaillants).

Les grossistes étaient définis par les acteurs de la filière comme des revendeurs qui achetaient au moins 10 plateaux d'œufs ou au moins 50 poules de réforme par achat. Les grossistes œufs s'approvisionnaient auprès des différents types d'éleveurs, indépendamment de la taille du cheptel de ceux-ci ou de la localisation de leurs exploitations. Ces revendeurs faisaient souvent le tour de plusieurs élevages afin de disposer d'une quantité d'œufs suffisante pour rentabiliser leur déplacement. Deux grossistes importants ont été identifiés dans la zone d'étude. Ils avaient plus une fonction de collecteur, achetaient au minimum 500 plateaux d'œufs par éleveur et revendaient à des grossistes moins importants. Les grossistes revendent à des détaillants, des restaurateurs et des pâtisseries. Les détaillants étaient des revendeurs dont la commercialisation d'œuf n'était pas l'activité principale. Il s'agit d'épiceries, de revendeuses de produits alimentaires au marché (légumes) ou de vendeurs itinérants. Ils revendaient exclusivement à des consommateurs. Les restaurateurs et pâtisseries achetaient les œufs auprès de grossistes ou des éleveurs, les transformaient et les vendaient également à des consommateurs finaux.

Les poules de réforme représentaient une source de revenus complémentaire à la vente des œufs ; elles étaient destinées à la consommation humaine et étaient vendues en vif par des détaillantes ou les éleveurs eux-mêmes pendant les périodes de fêtes religieuses. Elles étaient également vendues par l'intermédiaire des restaurateurs qui les revendaient après transformation à des consommateurs finaux. Il n'existait aucun abattoir destiné à la filière avicole. Les poules étaient abattues au marché par des intermédiaires souvent connus des revendeuses.

Voies d'amélioration des niveaux de production

La dynamique production d'œufs au Bénin est fortement tributaire de l'approvisionnement en matières premières pour l'alimentation des animaux, de l'organisation des acteurs de la filière et de la commercialisation des produits.

Disponibilité en matières premières pour l'alimentation

Les éleveurs et les fabricants d'aliments enquêtés étaient confrontés à la variation inter-saisonnière des flux et des prix de matières premières utilisées en alimentation avicole (Figure 4). Le maïs constitue en effet la base énergétique de l'aliment. Il était acheté principalement auprès de cultivateurs situés dans le nord du Bénin. C'est la matière première dont les cours ont le plus fluctué au cours de l'année (de 183 €/t en novembre 2011 à 260 €/t en août 2011 à Parakou dans le nord du Bénin alors qu'au marché international de Dantokpa dans le sud, ce prix a varié de 305 €/t en novembre à 427 €/t en août). Les prix ont aussi varié d'une zone géographique à une autre (183 €/t au nord et 305 €/t dans le sud en novembre). En 2003, les éleveurs ont également été confrontés à une augmentation des prix de vente et une indisponibilité du maïs. La proximité avec les pays voisins a favorisé la vente directe de cette matière première à des commerçants venant du Nigéria et proposant de meilleurs prix. Cette situation tend à déséquilibrer l'offre et entraîne un marché oligopolistique désavantageux pour les éleveurs. L'envolée des prix des céréales associée à des niveaux de volatilité élevés et persistants a contraint les acteurs concernés à revoir leurs stratégies d'approvisionnements présentées dans la section suivante.

Les protéines dans l'aliment étaient principalement apportées par des tourteaux de soja produits localement et achetés auprès des usines de trituration locales (huileries). L'augmentation de la demande tant au niveau local que sous-régional a favorisé une augmentation du prix du soja (Fig. 4.b) et son exportation vers des pays comme le Burkina-Faso ou le Togo. Des différences de prix de cette matière première ont également été observées en 2011 : en janvier, elle été vendue à 440 €/t dans le sud et à 400 €/t dans le Nord alors qu'en octobre, les prix ont presque doublé dans le sud en passant à 710 €/t alors qu'elle était vendue au même moment dans le nord à 450 €/t. De plus, les éleveurs étaient initialement réticents à une substitution du tourteau de soja dans l'aliment par du tourteau de coton ou du tourteau de palmiste car peu informés de la qualité de ces ressources alimentaires et les performances animales qui pourraient en découler. Certains se sont orientés vers l'approvisionnement auprès de petits ateliers de trituration de soja. Néanmoins, le coût élevé du tourteau de soja et l'éloignement des points d'approvisionnements secondaires ont progressivement favorisé l'utilisation des matières premières alternatives comme le tourteau de coton ou de palmiste : « *En cas*

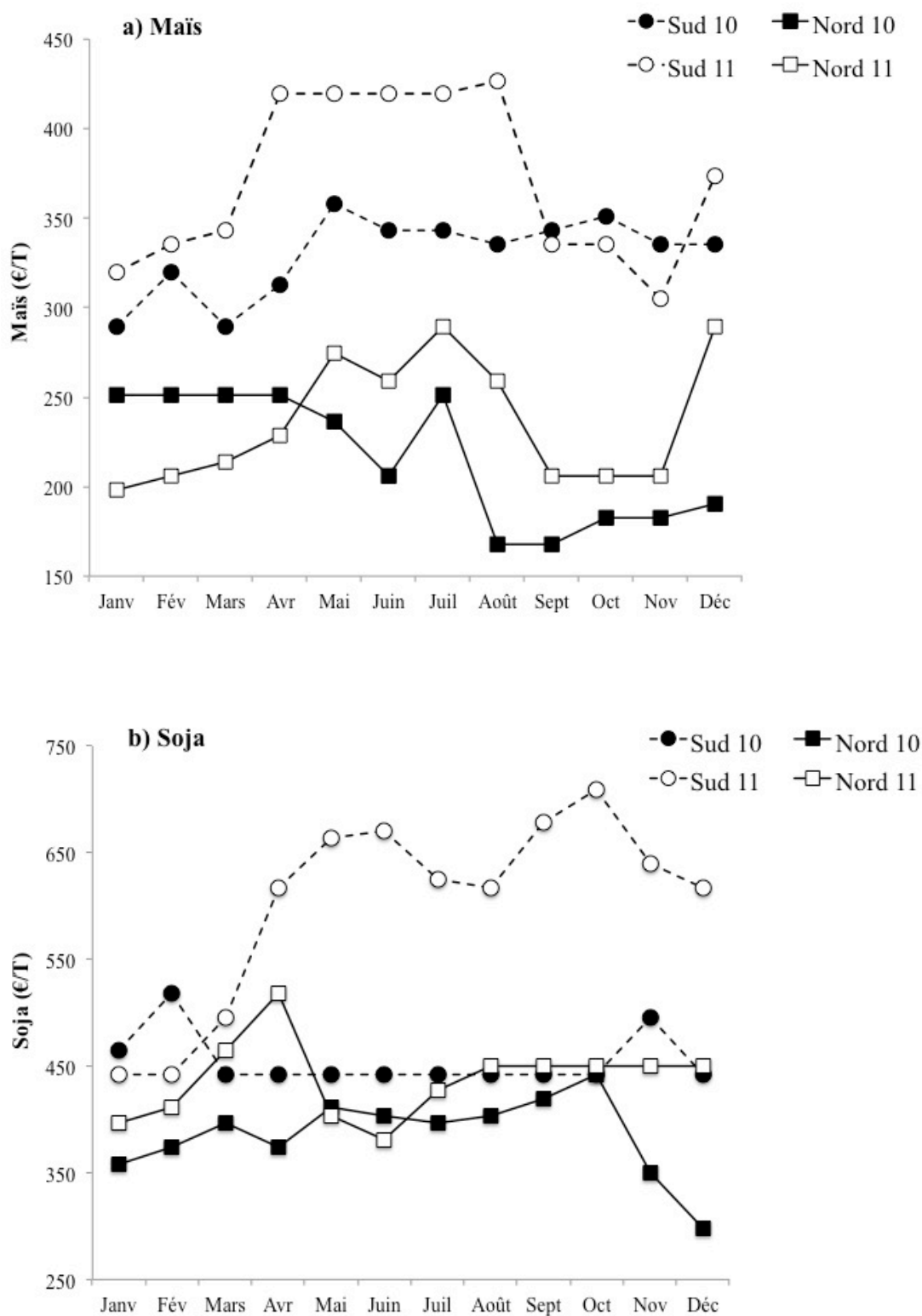


Figure 4 : Dynamique d'évolution des prix du maïs et de soja sur les marchés de Dantopka au Sud et de Parakou au Nord du Bénin en 2010 et 2011 (Source : Office National d'Appui à la Sécurité Alimentaire, Bénin, 2012)

d'indisponibilité ou de cherté du tourteau de soja, la formule alimentaire est réadaptée en fonction des matières premières disponibles. Le tourteau de soja est remplacé par exemple par le tourteau de coton ou des graines de soja torréfiées » (Eleveur n°7) ; « en général il y a souvent rupture de stock pour le tourteau de soja et le son de blé. Dans ces cas, on remplace par du tourteau de coton ou on incorpore du tourteau de karité, du tourteau d'arachide, de la farine de manioc ou du son de maïs » (Eleveur n°11).

Des organisations professionnelles en émergence

La filière de production et de commercialisation des œufs est caractérisée par un faible niveau d'organisation professionnelle des différents acteurs. En 2000, trois associations d'éleveurs existaient et se faisaient « concurrence » sur le terrain. D'après les éleveurs interrogés, on déplorait à cette période un manque d'échange et de dialogue formel entre les différents acteurs de la filière, notamment une faible réponse technique apportée par les associations d'aviculteurs face à la crise du maïs qui eu lieu 2003. Ces difficultés ont été à l'origine de l'émergence d'organisations professionnelles et de cadres de concertations entre les différents acteurs grâce à une dynamique insufflée par la Direction de l'Elevage (DE), structure décentralisée du Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche (MAEP). Les organisations qui sont nées à cette période sont : l'Union Nationale des Aviculteurs Professionnels du Bénin (UNAP-Bénin), l'Association Nationale des Fabricants d'Aliments du Bénin (ANFAB), les Fournisseurs de Poussins d'un Jour (FPJ), l'Association des Importateurs de Produits Vétérinaires (AIPV), l'Association des Prestataires de Services Vétérinaires en Aviculture Moderne (APSVAM), et l'Association des Vendeurs de Volailles (AVV). Malgré la récente création de ces organisations professionnelles, des difficultés subsistent encore quant à la réglementation de l'installation des éleveurs, la professionnalisation de chaque activité pour une standardisation des normes de production et un meilleur écoulement des produits avicoles.

Des circuits de commercialisation des produits très fluctuants

Les circuits de commercialisation des produits avicoles étaient multiples et dépendaient du type d'élevage. La commercialisation se faisait de façon très informelle et laissait apparaître des périodes de déficit ou au contraire de surproduction. Pendant la saison des pluies, les œufs se vendaient rapidement et la demande avait tendance à surpasser l'offre : « Pendant la saison des pluies, je vends plus d'œufs ; parfois même, on n'arrive pas à satisfaire la demande des clients revendeurs » (Grossiste œufs n°1). Inversement, pendant les saisons sèches, les restaurateurs vendaient moins de produits à base d'œufs ; ce qui créait une saturation du marché : « Quand il fait chaud, les cafétérias ne vendent

pas donc je suis obligé de réduire mes prix de vente pour que les grossistes puissent m'acheter les œufs » (Éleveur n° 10). Les œufs étaient alors vendus à des grossistes ou des détaillants à crédit : la vente de la marchandise couvrait ainsi les dettes contractées auprès du fournisseur. Certains éleveurs ou commerçants situés près des frontières avec le Nigéria vendaient les œufs dans ce pays alors que d'autres étaient obligés de jeter les œufs, faute de moyens de transformation et/ou de conservation. Les éleveurs avec de plus petits effectifs se contentaient d'une clientèle de proximité et vendaient là où s'exprimait le besoin. Cette faible maîtrise de l'écoulement des œufs témoignait donc d'une absence de structures adéquates pour un approvisionnement équilibré des marchés.

La commercialisation des poules de réforme était plus maîtrisée puisque les éleveurs s'arrangeaient pour reformer les poules pendant les fêtes de fin d'année, les fêtes chrétiennes et musulmanes. La demande en viande de volailles était parallèlement satisfaite par la filière traditionnelle de production de poulets, la filière poulets de chair et la filière d'abats de volaille importés de divers pays d'Europe. Cependant, il apparaît que le Bénin servait de corridor de transport de la viande de volaille surgelée en Afrique de l'Ouest. Bien qu'étant un important importateur de viande de volailles, la majeure partie des importations de volaille au Bénin était destinée au marché nigérian. La viande était transportée clandestinement vers les grands centres de consommation nigériens (USDA, 2014). L'augmentation de la demande en viande de volaille pendant les fêtes créait donc un marché presque certain pour l'écoulement des poules de réforme. Toutefois, la vente se faisait majoritairement en vif en raison de l'absence de chaîne de froid et du climat chaud et humide.

Stratégies de sécurisation des flux mises en place par les différents acteurs

Organisation de la filière

La filière de production d'œufs a connu diverses crises : en 2003, les acteurs étaient confrontés à une indisponibilité et à une augmentation des prix des matières premières et en 2006 à l'épidémie de l'influenza aviaire. Suite à ces différentes pressions, la filière a connu un début de structuration à l'échelle des territoires concernés. Des organisations professionnelles (OP) ont été créées au niveau de tous les maillons afin de mieux contribuer à la promotion et à l'émergence de la filière, par la maîtrise de la production, la transformation et la distribution. Ces cadres de concertations ont abouti en 2011 à la création de l'interprofession avicole du Bénin (IAB) chargée de coordonner les actions au niveau de toutes les organisations professionnelles de la filière et de porter les plaidoyers à tous les niveaux.

Ainsi, de nombreuses actions ont été menées par cette interprofession conjointement avec les différents services gouvernementaux. Pour sécuriser les flux de matières premières, l'IAB a convenu avec les usines de trituration locales d'un approvisionnement permanent en tourteaux de soja et de coton. Depuis 2009, au début de chaque année, une estimation des besoins en ces matières premières est communiquée aux usines qui se sont engagées à fournir les quantités requises. D'autres négociations étaient en cours pour fixer un prix maximum de vente afin de réduire la dépendance des éleveurs et fabricants d'aliments vis-à-vis des fluctuations de prix. De plus, l'UNAP est membre du consortium pour le développement des filières locales de production de soja et de maïs pour un renforcement des liens entre filières avicole et végétale.

Des politiques d'appui à la professionnalisation des éleveurs ont été élaborées par le Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche et l'IAB. Des ateliers de formation ont ainsi été organisés pour sensibiliser les différents acteurs aux notions de biosécurité, techniques et pratiques d'élevage. Des textes réglementaires ont été également mis en place pour réguler l'installation des éleveurs dans des zones dédiées à la production agricole. Il faut mentionner qu'avec les pressions enregistrées sur le foncier et l'urbanisation grandissante, des élevages autrefois en campagne, se sont retrouvés en pleine zone urbaine. Un moratoire de quelques années a été accordé aux exploitations situées dans les centres urbains pour se déplacer vers des zones que les maires et autorités locales avaient définies comme agricoles.

Au plan sous-régional, des relations ont été créées entre les associations locales et celles des autres pays ou encore avec des partenaires financiers de l'UEMOA. Des échanges sont organisés chaque année à travers les « journées techniques de l'aviculture » afin de réfléchir aux enjeux régionaux et promouvoir le commerce intra-régional.

Apparition de nouveaux acteurs

En dehors des crises saisonnières d'écoulement des produits et de disponibilité de matières premières, la filière a été confrontée entre 2000 et 2004 à une augmentation des importations en œufs réfrigérés de pays occidentaux et vendus à des coûts plus faibles que les œufs produits localement. A chaque crise, des éleveurs ont été éliminés du processus de production, laissant place à d'autres éleveurs plus compétitifs avec des tailles de cheptels plus élevées. Ainsi, l'importation des œufs réfrigérés au Bénin a entraîné la fermeture de 13 % des exploitations avicoles du fait des difficultés d'écoulement de leurs productions (Onibon et Sodegla, 2006). Un accord d'arrêt (convention) des importations d'œufs réfrigérés conclu en 2005 entre les éleveurs, la DE et les principaux importateurs a été un moteur de développement de la production d'œufs. Cet accord a contribué à

l'augmentation des cheptels aviaires et à l'expansion géographique des exploitations avicoles, installées près d'autres grandes villes, notamment dans le Nord. Le cheptel national de poules pondeuses est passé de 275.000 têtes en 2006 dont 96% des élevages étaient situés dans le sud du Bénin à plus de 500.000 en 2009 dont 87% sont localisés dans le sud (TDH, 2010).

L'augmentation de la taille des élevages a créé des besoins en intrants avicoles (poussins d'un jour, aliments, produits sanitaires), peu satisfaits par les acteurs existants. Les couvoirs locaux et les fournisseurs de poussins ne disposaient pas d'une capacité de production suffisante pour satisfaire la demande en poussins ; les vendeurs de matières premières avaient des difficultés pour approvisionner tous les éleveurs. Ainsi, pour répondre à la demande élevée en intrants et services techniques des élevages, sont apparus de nouveaux acteurs spécialisés en fourniture d'animaux vivants, fabrication d'aliments, importation de produits sanitaires et additifs alimentaires et prestataires de services techniques. Un approvisionnement de « poulettes prêtes à pondre » âgées de 16 semaines d'âge a été mis en place par l'éleveur de type industriel. Ce nouveau système présente l'avantage de permettre aux petits éleveurs des types 2 et 4 de limiter les difficultés financières et techniques liées à l'alimentation des animaux pendant la phase d'élevage (0-16 semaines) et de disposer d'une source de revenus immédiate. Cinq éleveurs enquêtés s'approvisionnaient en poulettes plutôt qu'en poussins d'un jour.

Dans la même dynamique et pour pallier les difficultés d'approvisionnement et fluctuations de prix de matières premières que subissaient les éleveurs, une usine de fabrication d'aliments pour pondeuses a été créée par le plus grand importateur d'additifs alimentaires de la filière. Pour garantir un approvisionnement continu de son usine en soja, ce dernier en produit une partie, l'autre partie étant achetée auprès des usines locales. Le maïs est acheté directement auprès de producteurs ou de grossistes dans tout le pays : « *On achète le maïs là où on en trouve. En général, on arrive dans une zone de production et on ramasse dans les hameaux ce qu'il y a de disponible* » (Groupe Vêto Services, S.A.). Cette entreprise a embauché à temps plein une ancienne commerçante de matières premières qui est basée dans le nord du Bénin et dont les activités étaient exclusivement la collecte et l'achat de matières premières pour le groupe.

Partenariats et rapports de force entre acteurs

Les pratiques de contractualisation à l'amont et à l'aval étaient quasi inexistantes. Les approvisionnements en matières premières auprès des grossistes étaient contractualisés oralement et étaient non formels. Néanmoins, ces contrats, quoique moraux revêtent une grande importance dans le fonctionnement de la filière. Les plus gros éleveurs (types

d'élevage 1 et 3) qui faisaient des achats importants en matières premières avaient l'assurance d'être approvisionnés au besoin sans avoir à prospector le marché à la recherche de nouveaux fournisseurs. Les quantités achetées par ces types d'exploitation facilitaient un paiement de la facture uniquement à la réception de la marchandise. En échange, les grossistes s'engageaient à leur livrer en priorité les quantités nécessaires même en cas d'indisponibilité sur le marché. Pour assurer leurs engagements auprès de « gros clients fidèles », ces derniers collectaient la matière première demandée auprès des plus petits cultivateurs dans différentes régions du Bénin ou de la sous-région. Le paiement au comptant de la marchandise auprès des producteurs de matières premières leur garantissait en permanence l'accessibilité à plusieurs sites de production. Ces grossistes, vendeurs de matières premières n'acceptaient de fournir de nouveaux clients que si ceux-ci étaient recommandés par d'anciens clients, se portant garants de la solvabilité de ces derniers. Les petits éleveurs du type 3 s'approvisionnaient auprès de détaillants. L'absence de moyens de stockage et la taille de leurs cheptels ne leur permettaient pas d'acheter en grandes quantités les matières premières. Il s'agissait donc d'approvisionnements opportunistes qui se faisaient auprès de détaillants disposant de la matière première au moindre coût. Les transactions marchandes se faisaient donc au comptant. Les éleveurs habitués à un détaillant pouvaient toutefois avancer de l'argent afin d'être sûrs d'être livrés en cas de pénurie de la matière première.

Par ailleurs, les pratiques de fidélisation à l'aval de la filière existaient notamment pour la commercialisation des œufs. Les éleveurs du type 2 entretenaient une relation de fidélité avec leurs clients grossistes à qui ils vendaient de façon prioritaire en cas d'augmentation de la demande ou à paiement différé en cas de mévente. Cette contractualisation reposait sur le fait que les grossistes constituaient la base financière et le centre d'information de la filière. Dans une économie où l'accès au crédit et aux liquidités était difficile, les ressources monétaires du grossiste œuf étaient fondamentales pour la pérennité de l'exploitation. Ainsi, le grossiste conscient de cet avantage, utilisait les informations provenant des aires d'approvisionnement : « *ton collègue éleveur m'a vendu les œufs à un prix plus faible* » (Eleveur n°16) et des différents marchés « *on n'arrive pas à vendre au marché* » (Eleveur n°14) pour fixer le prix des œufs. Cette pratique de marchandage des prix d'achat se retrouvait davantage au niveau des petits éleveurs des types 2 et 4. Les grossistes se permettaient parfois de refuser la marchandise pour faire baisser les prix. A l'inverse, ces petits éleveurs avaient l'avantage de vendre les œufs à une clientèle diversifiée (pâtisseries, restaurateurs) et de proximité. Certains privilégiaient la vente à des détaillants et des particuliers qui étaient plus fidèles.

L'éleveur de type « industriel » avait un réseau de revente assez diversifié lui permettant de sécuriser la pérennité de son exploitation. Les grossistes préalablement inscrits sur une liste et connus des agents commerciaux s'engageaient à un achat minimal à chacun de leur passage et à la fréquence qui leur convenait. Un changement d'habitude ou de fréquence d'approvisionnement pendant les périodes de mévente donnait lieu à un refus de vente lors des prochaines commandes. Sachant que les œufs de son exploitation étaient très demandés dans la ville de Cotonou grâce à plusieurs campagnes publicitaires, ce rapport de force existant avec les grossistes lui conférait une capacité d'accroissement de sa production. Les grossistes s'approvisionnant régulièrement chez lui avaient ensuite été incités à former une association dont les membres pouvaient visiter ses installations avicoles, les ventes se faisant dans un point de vente aménagé. De plus, des cadeaux clients étaient offerts à ces derniers pour maintenir de bonnes relations et pérenniser les affaires.

DISCUSSION

Une filière basée sur la dichotomie formel-informel

Une des caractéristiques de la filière œufs au Bénin est la présence d'un secteur informel très développé côtoyant des activités formelles. L'exportation illégale des matières premières végétales vers le Nigéria ou encore la commercialisation des œufs au niveau des frontières bénino-nigérianes témoigne de la présence d'un secteur informel qui pourrait fragiliser les l'organisation amont et aval de la filière. Mais il existe également des circuits informels de commercialisation des œufs sur le territoire étudié. La vente d'œufs ne se fait pas toujours dans un cadre légal et réglementaire. De même, les circuits d'approvisionnement en maïs bénéficie du dynamisme du secteur informel du commerce des produits végétaux. Par ailleurs, la prescription de produits vétérinaires par des agents non autorisés à le faire ou non inscrits à l'ordre des médecins vétérinaires (techniciens en santé animale, éleveurs) et la délivrance de conseils techniques (formulation d'aliments, suggestion d'itinéraires techniques) par ces mêmes personnes sont des exemples d'existence d'un secteur informel qui permet aux acteurs de s'adapter aux difficultés d'approvisionnement en intrants. A l'opposé, les approvisionnements en produits vétérinaires et additifs alimentaires sont maîtrisés et assurés par les services étatiques (vaccins et autres produits biologiques) ou par des entreprises inscrites au registre de commerce (additifs). Le positionnement des acteurs par rapport au secteur formel reste néanmoins ambigu : un éleveur peut s'approvisionner en intrants auprès de services déclarés, donc être présent dans le secteur formel et peut revendre ses produits via des circuits peu formels si aucun autre choix ne s'offre à lui.

Il apparaît toutefois que les activités informelles « ne sont pas nécessairement réalisées avec l'intention délibérée de se soustraire au paiement des impôts ou des cotisations de sécurité sociale, ou d'enfreindre la législation du travail, d'autres législations ou d'autres dispositions administratives » (BIT, 1993). L'existence de ces circuits d'approvisionnement et de commercialisation parallèles révèle plutôt l'absence de réglementations clairement définies ou une incapacité de l'Etat à faire appliquer ses propres lois. Il s'agit selon Charmes (1990) d'une question d'inadaptation, d'impuissance et même d'absence de volonté de régulation, à l'égard de ces emplois spontanément créés dans un contexte de chômage et de sous-emploi élevés. Il s'avère enfin important d'identifier les conditions nécessaires au changement ou au maintien du ratio formel sur informel existant et d'en hiérarchiser les avantages et inconvénients dans le cadre du développement de la filière.

Gestion des approvisionnements et des ventes

La filière avicole moderne béninoise est dans une dynamique de progression et de structuration forte à l'instar d'autres filières africaines (Bastianelli, 2001). La création des organisations professionnelles et de l'interprofession a permis de limiter plusieurs contraintes liées à la disponibilité des matières premières. La production a augmenté ces dernières années et les perspectives d'évolution des types d'exploitation identifiés correspondent principalement à l'augmentation de la taille du cheptel. La demande semble donc pouvoir progresser à l'image du modèle *push/pull* défini par Jensen *et al.* (2010) selon lequel les fournisseurs de matières premières exercent une pression sur la filière (*push*) et les éleveurs produisent pour répondre à la traction venant du marché (*pull*). Cependant, il subsiste encore des interrogations quant à la gestion des approvisionnements en poussins et des variations inter-saisonnières et géographiques des prix des matières premières. La filière est aujourd'hui majoritairement dépendante de l'importation en poussins d'un jour (25 des aviculteurs enquêtés) et le seul couvoir fonctionnel importe les œufs à couvrir. Il y a lieu de s'interroger sur la pérennité d'une telle filière sachant que l'approvisionnement peut être compromis par des arrêts d'importation, notamment dans le cadre de crises sanitaires. Les importations de poussins d'un jour du Nigéria ont d'ailleurs été interdites par le gouvernement depuis l'épidémie de grippe aviaire en 2006 pour éviter une dissémination en cas de pathologies. Mais ces importations sont-elles toujours contrôlées dans un environnement socio-économique et politique où le libre échange des biens et personnes est promu ?

En outre, les variations inter-saisonnières et géographiques du prix des matières premières agricoles constituent une caractéristique structurelle des marchés des produits

agricoles en Afrique (Diallo *et al.*, 2011). Sachant que l'aliment représente le poste de dépenses le plus élevé en élevage avicole (Bastianelli, 2001), de telles variations de prix réduisent la capacité de résilience des exploitations. Il transparaît par exemple du discours de l'éleveur du type industriel qu'il souhaite acquérir une certaine autonomie en termes d'approvisionnement en matières premières pour pallier ces difficultés et être plus compétitif. Au regard des différents types d'élevage identifiés, quelles sont les alternatives dont disposent les plus petits éleveurs de la filière face à de telles difficultés d'approvisionnement ? L'analyse a montré des réticences des éleveurs à s'orienter vers d'autres matières premières en cas de rareté du maïs ou du tourteau de soja. Dans les pays voisins également, il existe une faible substitution entre les céréales dont les prix varient le plus (maïs, riz) et les céréales sèches locales (mil, sorgho) (Diallo *et al.*, 2011). Nos enquêtes ont montré que les prix de vente du mil ou du sorgho rouge varient très peu au cours de l'année ; en 2011, ces matières premières étaient vendues à 269 ± 9.2 €/t et 556 ± 22.9 €/t, respectivement sur les marchés de Parakou (Nord-Bénin) et de Dantokpa (Sud-Bénin). Sous l'hypothèse d'un avantage compétitif en terme de rapport qualité/prix, l'utilisation de ces matières premières en périodes de cherté du maïs peut donc constituer une alternative dans les élevages avicoles. Des études ont montré que le millet et le sorgho pouvaient être utilisées en alimentation animale (Baurhoo *et al.*, 2011 ; Torres *et al.*, 2013) et peuvent ainsi offrir une protection par rapport aux fluctuations de prix du maïs sur les marchés domestiques et internationaux. Une amélioration de l'approvisionnement en matières premières et une meilleure connaissance des avantages liés à une utilisation de matières premières disponibles localement semblent donc être indispensables à l'amélioration des performances des animaux.

Par ailleurs, une autre caractéristique de la filière est la faible organisation et maîtrise des circuits de distribution des œufs. L'UNAP a envisagé la possibilité de créer une centrale d'achat et de distribution des œufs qui aurait en charge la collecte des œufs auprès des éleveurs avec une garantie de commercialisation de leurs produits. Une telle organisation exige néanmoins un contrôle de la qualité des produits et la mise en place de politiques d'indemnisation en cas de problèmes sanitaires ou de conservation. Ce qui souligne : i) la nécessité de mécanismes d'assurance de l'élevage avicole encore inexistant dans la filière et ii) une meilleure professionnalisation des éleveurs avec des pratiques d'élevage et des modes de conduites maîtrisés et connus. Le plus grand élevage de la filière (type industriel) qui approvisionne déjà certaines exploitations en poulettes à 16 semaines d'âge envisage de créer un système intégré de la production. Il fournirait les animaux, l'aliment, les soins vétérinaires et un cahier des charges définissant les conditions de production et s'occuperait ensuite de la distribution des produits. En

définitive, il ressort de tout ceci qu'il existe une volonté d'uniformisation des pratiques émanant de l'UNAP ou d'un éleveur influent dans la filière. Cette approche est de plus en plus avancée comme étant le moyen d'améliorer l'environnement commercial des produits alimentaires et favoriser le commerce intra-régional entre les différents pays de l'UEMOA² (Nyoro *et al.*, 2007). En dépit des avantages que peuvent présenter un régime harmonisé de pratiques ou de normes, il peut y avoir des coûts importants. Le respect des normes ou des pratiques peut générer des coûts supplémentaires liés à des exigences d'inspection, limitant ainsi la compétitivité de ces produits alimentaires. Les petits éleveurs pourraient également être éliminés du système en raison de normes trop élevées pour les débouchés dont ils disposent (Keyser, 2012). Il convient alors d'identifier le système plus approprié pour le développement et la pérennité de la filière sachant qu'une harmonisation ou standardisation peut se décliner de différentes façons et s'adapter aux contextes socio-économiques de chaque pays (Keyser, 2012).

Les limites de la méthode qualitative

Le développement de la filière œufs autour des grandes villes béninoises est assez récent. Il répond à une augmentation de la demande urbaine en lien avec une croissance démographique et à l'augmentation des revenus. La présente étude a décrit l'organisation de la filière, interrogé les stratégies des acteurs, identifié et caractérisé les contraintes au commerce d'un produit. Néanmoins, l'analyse reste qualitative et conserve une part de subjectivité sachant qu'elle transmet les ressentis de chaque acteur et leurs souhaits d'évolution. Elle illustre l'intérêt que portent les acteurs à la filière et à son fonctionnement. Elle reprend très peu d'éléments quantitatifs sur la gestion des flux dans la filière et l'analyse économique des circuits commerciaux associés, par manque d'accessibilité voire d'existence de ces données. Une analyse comptable aurait été pertinente, permettant ainsi d'évaluer les marges des acteurs commerciaux aux différents échelons. Par conséquent, l'absence de relevés de prix et des quantités produites au niveau de chaque maillon est une faiblesse identifiée dans cette filière. Une étude économique détaillée permettrait de simuler l'influence de divers paramètres techniques sur la valeur ajoutée des exploitations avicoles et la répartition de cette valeur ajoutée au niveau des autres acteurs de la filière.

² UEMOA : Union Economique et Monétaire Ouest Africaine

Perspectives d'évolution de la filière

L'accord d'arrêt des importations d'œufs réfrigérés en 2005 a marqué le début de structuration de la filière et le développement de la production locale d'œufs. Ainsi, trois phases ont été distinguées dans la caractérisation de la filière : i) une première phase de stagnation de la production, ii) une phase de développement et iii) une proposition de scénarios d'évolution au regard des forces motrices et opportunités présentes (Figure 5.a et 5.b).

Des évolutions ont été observées tant du point de vue de la caractérisation de la filière que des pratiques d'élevage (Fig. 5a). Les exploitations avicoles étaient installées dans des zones de campagne autour des grandes villes. Ces zones n'étaient pas définies suivant un plan d'aménagement comme étant destinées à la production avicole mais l'acquisition du foncier dépendait du capital apporté par l'acheteur. Face à l'urbanisation croissante, à la pression foncière et à l'installation des populations à la périphérie des villes, certaines exploitations se sont retrouvées en zones urbaines et donc considérées comme sources de pollution environnementale : « *Quand je me suis installée ici il y a 20 ans, il n'y avait personne. J'ai électrifié la zone et aujourd'hui, l'Etat me demande de déplacer mon exploitation parce que je suis en zone urbaine* » (Eleveur n°3). Avec la mise en place d'un texte de réglementation mis en place par l'Etat et en concertation avec l'UNAP, l'installation des exploitations est un peu plus contrôlée. Ce texte stipule que « la construction de bâtiments d'élevage dans une zone doit être soumise à l'accord des autorités communales et doit être réalisée dans des zones affectées à l'agriculture ». Il accorde également un délai de 5 ans aux éleveurs ayant des constructions en zones urbaines pour déménager dans des zones plus appropriées. Cet état suggère donc que l'installation sera plus réglementée dans le futur et que l'élevage péri-urbain se développera dans des zones dédiées. Néanmoins, les difficultés d'accès au financement pour la création et le développement des exploitations avicoles a conduit à la nécessité d'investir des capitaux propres dans l'activité et a limité l'installation des plus jeunes (Fig. 5b). La création de l'AMAB (Assurance, Mutuelle Agricole du Bénin) née de la volonté de l'Etat et de l'engagement des producteurs à mettre en place des mécanismes d'assurance appropriés pour le secteur agricole représente un facteur de changement pouvant conduire à l'assouplissement des conditions de financement ou à la création de banques (agricoles) moins réfractaires à l'investissement dans ce secteur.

Par ailleurs, l'absence de formations professionnelles adéquates a longtemps caractérisé le faible professionnalisme des acteurs de la filière (mélange de matières premières pour la fabrication de l'aliment pour animaux à même le sol, absence de prophylaxie car jugée inutile). La création des différentes organisations professionnelles et

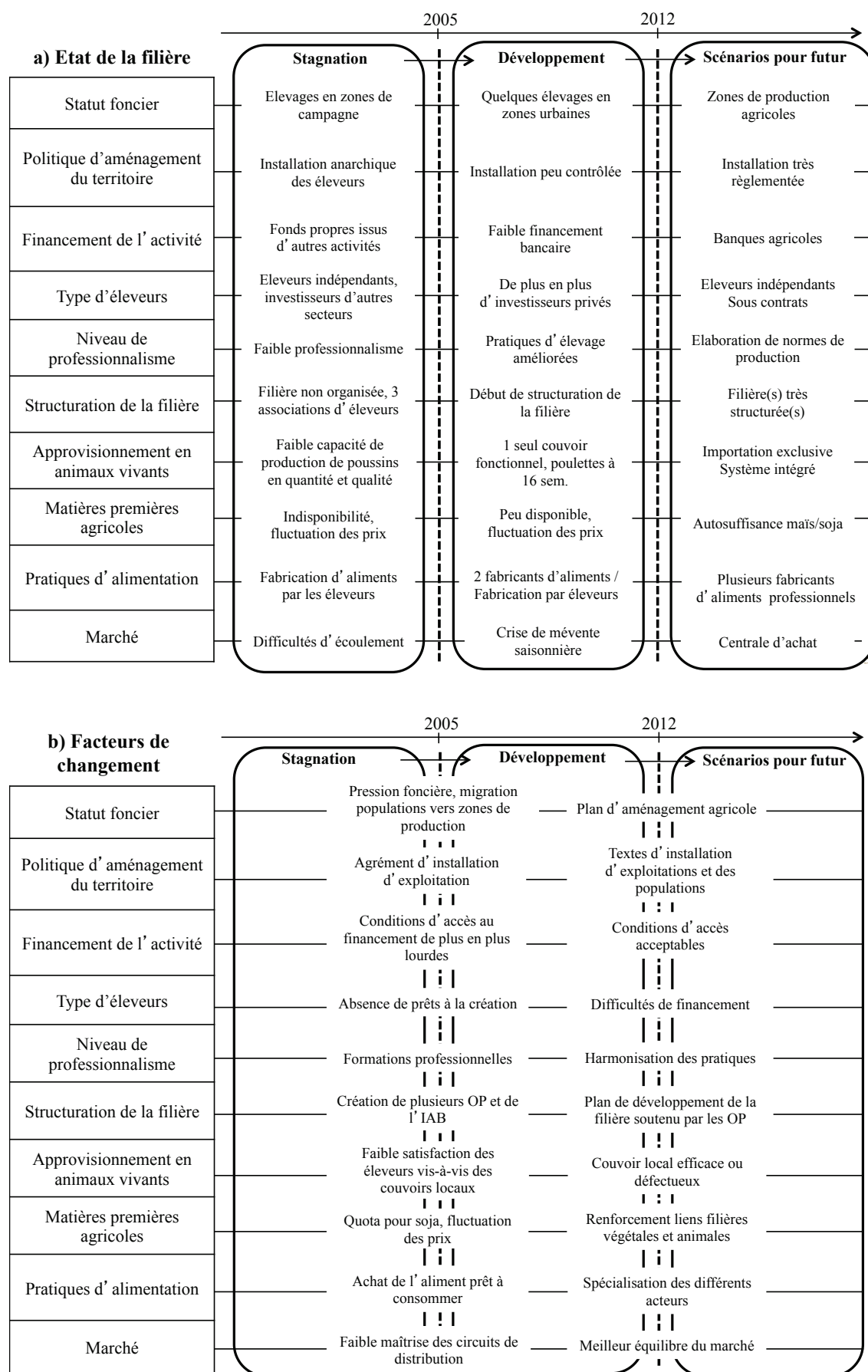


Figure 5 : Transitions, facteurs de changement et perspectives d'évolution de la filière de production d'œufs

la mise en place de programmes de formation financés par le gouvernement et à destination de tous les acteurs ont contribué à l'amélioration des pratiques d'élevage et d'alimentation. L'aliment est aujourd'hui acheté par certains éleveurs, la fourniture de poulettes a limité les difficultés techniques et financières qui pouvaient exister pendant la phase d'élevage des animaux. Un scénario possible d'évolution de la filière serait l'élaboration de normes de production béninoises ou l'uniformisation des pratiques permettant d'améliorer les niveaux de productivité et de couvrir des marchés régionaux.

CONCLUSION

La filière de production d'œufs béninoise est en pleine expansion et composée de plusieurs acteurs en relation au sein du territoire étudié. L'accord d'arrêt (convention nationale) des importations d'œufs qui a favorisé l'installation de nouvelles exploitations et l'apparition de nouveaux acteurs a été l'une des forces motrices de cette filière. Cette étude a permis d'analyser les goulots d'étranglement présents au niveau de la filière et les stratégies adoptées par les différents acteurs pour les surmonter. Des organisations professionnelles ont été créées au niveau de tous les maillons pour sécuriser les flux de matières premières et mieux contribuer à la maîtrise de la production. Des accords ont été conclus entre les usines de trituration d'oléagineux sur le territoire pour garantir un approvisionnement minimum de tourteaux de soja et de coton. Un consortium existe pour le développement et le renforcement des liens entre acteurs des filières locales de production de soja et de maïs et acteurs de la filière avicole. Cependant, compte tenu de l'instabilité des prix de matières premières sur les marchés, il paraît nécessaire de réfléchir à des systèmes d'alimentation alternatifs offrant plus de souplesse dans les différents types d'exploitations identifiés. Les perspectives de ce travail sont donc orientées vers l'alimentation des pondeuses comme un point clé de la pérennité et du développement de la filière. Ainsi, les travaux envisagés devraient être orientés vers la mise en place d'alternatives à l'utilisation des matières premières classiques pas toujours disponibles ou l'application de systèmes plus efficaces dans les élevages présentant un niveau technique plus élevé. Par ailleurs, cette étude a également permis d'identifier d'autres leviers de développement de la filière comme étant l'approvisionnement en poussins et la maîtrise des circuits de distribution des produits. La création d'une centrale d'achat et de distribution des œufs pourrait favoriser approvisionnement continu et équilibré des marchés mais des réflexions devraient être menées quant aux mécanismes d'assurance des produits, aux politiques d'indemnisation en cas de détérioration de la marchandise.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier toutes les personnes, institutions et organisations professionnelles, en particulier l'Union Nationale des Aviculteurs Professionnels du Bénin (UNAP-Bénin), qui ont contribué activement à la réussite de ces travaux. Nos remerciements vont également à Frédéric Houndonougbo de l'UAC-LARAZE pour ses conseils avisés lors du travail d'enquête et à Bertrand Méda de l'INRA-URA pour ses contributions à la rédaction de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

1. BASTIANELLI D., 2001. Etude des filières avicoles intensives au Burkina Faso. In : GRIFFON, M. (coord.). Filières agroalimentaires en Afrique : comment rendre le marché plus efficace ? Ministères des affaires étrangères, p. 113-145.
2. BAURHOO N., BAURHOO B., MUSTAFA A.F. et ZHAO X., 2011. Comparison of corn-based and Canadian pearl millet-based diets on performance, digestibility, villus morphology, and digestive microbial populations in broiler chickens. *Poult. Sci.* **90**, 8 p.
3. BIT, 1993. Rapport de la XV^{ème} Conférence internationale des statisticiens du travail, Genève 19-28 janvier, BIT.
4. BONAUDO T., POCCARD-CHAPUIS R., LESCOAT P., COUTINHO C., GRAWITZ T., LOSSOUARN J., 2011. Articulation d'une filière avicole autour d'un territoire : une méthodologie d'étude. *Neuvièmes Journées de la Recherche Avicole*, Tours, France, 29-30 mars 2011, 4 p.
5. CHARMES J., 1990. Une revue critique des concepts, définitions et recherches sur le secteur informel. In : Turnham D., Salomé B., Schwarz A., Eds, Nouvelles approches du secteur informel. Séminaire sur le Secteur Informel, Paris, France, 1989, p. 11-51.
6. DIALLO B., NANGO D. et STAATZ J., 2011. Impact des cours mondiaux sur les prix des céréales ouest africaines : bilan, opportunités et risques. *Grain de sel*, N° 54-56, Avril-Décembre 2011, 3 p.
7. DJAMEN P., 2008. Territoire, Filière et Temps : modalités et enjeux de l'insertion marchande des systèmes d'élevage bovins au Nord-Cameroun. Thèse de doctorat, AgroParisTech, France, 295 p.
8. DUTEURTRE G., KOUSSOU M. O. et LETEUIL H., 2000. Une méthode d'analyse des filières. Synthèse de l'atelier du 10 - 14 avril 2000 LRVZ, N'Djamena, 36 p.
9. FAO, 2014. Situation alimentaire mondiale : indice FAO des prix des produits alimentaires. Consulté le 21 Août 2014 sur <http://www.fao.org/worldfoodsituation/foodpricesindex/fr/>.

10. FAOSTAT 2014. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAOSTAT database. Consulté le 21 Août 2014 sur <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/P/PP/E>.
11. FOLEY J.A., RAMANKUTTY N., BRAUMAN K.A., CASSIDY E.S., GERBER J.S., JOHNSTON M., MUELLER N. D., O'CONNELL C., RAY D.K., WEST P.C., BALZER C., BENNETT E.M., CARPENTER S.R., HILL J., MONFREDA C., POLASKY S., ROCKSTROM J., SHEEHAN J., SIEBERT S., TILMAN D. et ZAKS D.P.M., 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, **478**, 6 p.
12. GRIFFON M., BOUTONNET J.P., DAVIRON B., DEYBE D., HANAK-FREUD E., LOSCH B., MOUSTIER P. et RIBIER V., 2001. Filières agroalimentaires en Afrique : comment rendre le marché plus efficace ?, Ministère des Affaires Etrangères, 314 p.
13. HUSSON F., LÊ S. et PAGES J., 2009. Analyse de données avec R. Rennes, France, Presse Universitaire de Rennes (éds), 224 p.
14. JENSEN T.K., NIELSEN J., LARSEN E.P. et CLAUSEN J. 2010. The fish industry - toward supply chain modeling. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, **19(3-4)**, 214-226.
15. KEYSER J., 2012. Regional quality standards for food staples in Africa : Harmonization not always appropriate. *Africa Trade Policy Notes*, N° 33, 12 p.
16. LOSSOUARN J., 2003. Stratégies dans les filières animales. *Inra Prod. Anim.*, **16(5)**, 317-324
17. MONTIGAUD J.C., 1989. Les filières fruits et légumes et la grande distribution : méthodes d'analyses et résultats. In : Economie des filières en régions chaudes, X^e Séminaire d'économie et de sociologie, Montpellier, France, 11-15 septembre 1989, p.37-50.
18. NYORO J.K., AYIEKO M. et MUYANGA M., 2007. The Compatibility of trade policy with domestic policy interventions affecting the grains sector in Kenya. FAO's workshop on Trade and Policy for Food Products Conducive to Development in Eastern Africa, 1-2 March, 2007, Rome.
19. ONIBON P. et SODEGLA H., 2006. Etude de la sous-filière aviculture moderne au Bénin. Rapport integral MAEP-DPP, 110 p.
20. PORTER M., 1990. The Competitive Advantages of Nations. *Harvard Business Review*, **68**, pp 73-93.
21. RAE A. et NGAYA R. 2010. Trends in consumption, production, and trade in livestock and livestock products. In: Steinfeld H., Mooney H.A., Schneider F. et Neville L.E., Eds, *Livestock in a changing landscape: Drivers, consequences and responses*, Vol 1. Island Press, Washington, USA, p. 11-33.

22. RAIKES P., JENSEN M.F. et PONTE S. 2000. Global commodity chain analysis and the french *Filière* approach: comparison and critique. *Economy and Society*, **29(3)**, 390-417.
23. RASTOIN J.L. et GHERSI G., 2010. Le système alimentaire mondial : concepts et méthodes, analyses et dynamiques. Quae, Versailles, France, 565 p.
24. R CORE TEAM, 2013. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
25. SOULE G. 2013. Revue analytique des stratégies nationales d'investissement et de politiques agricoles en vue de la promotion des filières de base en Afrique de l'ouest. In: Elbehri A., Ed., Reconstruire le potentiel alimentaire de l'Afrique de l'Ouest. FAO/FIDA, pp 91-124.
26. TDH 2010. Caractérisation et géo-référencement des exploitations avicoles commerciales et des marchés de volaille vivantes au Bénin.
27. TORRES K.A.A., PIZAURO Jr. J.M., SOARES C.P., SILVA T.G.A., NOGUEIRA W.C.L., CAMPOS D.M.B., FURLAN R.L. et MACARI M., 2013. Effects of corn replacement by sorghum in broiler diets on performance and intestinal mucosa integrity. *Poult. Sci.* **92**, 8 p.
28. USDA, 2014. Gain Report : Global Agricultural Information Network - Benin. USDA Foreign Agricultural Service, Mars 2014, 22 p.

Chapitre 2 : Substitution de deux matières premières limitantes en milieu chaud : quelles lois de réponses chez le poulet de chair ?

Publication n°2: Batonon DI, Umar Faruk M, Lescoat P, Weber GM and Bastianelli D.
Inclusion of sorghum, millet and cottonseed meal in broiler diets: a meta-analysis of effects on performance. *Animal, Soumis*

Publication n°3: Batonon DI, Bastianelli D, Lescoat P, Weber GM and Umar Faruk M.
Simultaneous inclusion of sorghum and cottonseed meal or millet in broiler diets: effects on performance and nutrient digestibility. *Animal, Soumis*

L'étude filière a souligné l'importance d'une diversification des matières premières à utiliser en aviculture en pays chauds. L'analyse bibliographique initiale montre une certaine confusion dans les résultats observés. Ce chapitre a donc pour objet d'instruire quelques réponses concernant des matières premières largement répandues mais peu utilisées.

Ce chapitre est divisé en deux parties dont la première est consacrée à un article intitulé : « *Inclusion of sorghum, millet and cottonseed meal in broiler diets: a meta-analysis of effects on performance* ». Il y est présentée une méta-analyse portant sur l'utilisation de trois matières premières en remplacement du maïs et du tourteau de soja chez le poulet de chair. Les effets d'une substitution de ces matières premières ont été évalués. Ce travail a également fait l'objet d'une communication orale à l'*European Poultry Conference* en 2014.

À l'issue de cette méta-analyse, il est apparu important d'évaluer *in vivo* les résultats obtenus et d'étudier les interactions pouvant résulter d'une combinaison de ces matières premières dans l'aliment du poulet. Cette seconde partie a fait l'objet d'un article intitulé : « *Simultaneous inclusion of sorghum and cottonseed meal or millet in broiler diets: effects on performance and nutrient digestibility* ».

Publication 2 :

Plusieurs études ont montré l'intérêt d'utiliser le millet (*Pennisetum glaucum*, *Setaria italic*, etc.) ou le sorgho (*Sorghum bicolor*) comme alternative au maïs et le tourteau de coton (*Gossypium spp.*) en remplacement du tourteau de soja dans l'alimentation des volailles de chair. Cependant, des résultats contradictoires ont été rapportés dans la littérature pour les céréales comme pour le tourteau de coton. Au regard de ces résultats, il paraît utile de collecter les données de ces études et d'appliquer des outils statistiques pertinents pour permettre de tirer des conclusions plus étayées. La méta-analyse de données est une méthode pertinente pour résumer et quantifier les connaissances acquises à partir de résultats antérieurs. Ainsi, l'objectif de ce travail était d'étudier l'effet qualitatif et quantitatif de ces ingrédients sur les performances des poulets de chair.

Une méta-analyse³ a été réalisée pour étudier la réponse du poulet de chair à l'incorporation dans l'aliment des matières premières alternatives suivantes : millet, sorgho et tourteau de coton. La base de données utilisée contenait 186 traitements de 25 expériences différentes publiées entre 1990 à 2013. Les résultats ont montré un effet du type d'ingrédient sur la consommation alimentaire et les performances de croissance avec un meilleur indice de consommation obtenu avec le millet. Aucune relation linéaire n'a été établie entre le niveau de substitution et les variables d'intérêt pour tous les ingrédients.

³ Ce travail a fait l'objet d'un article soumis dans *Animal*.

Inclusion of sorghum, millet and cottonseed meal in broiler diets: a meta-analysis of effects on performance

D. I. Batonon^{1,2}, M. Umar Faruk², P. Lescoat³, G. M. Weber⁴, D. Bastianelli⁵

¹INRA, UR83 Recherches Avicoles, F-37380 Nouzilly

²Research Centre for Animal Nutrition and Health, DSM Nutritional Products France, Saint Louis, France

³AgroParisTech, UMR 1048 SADAPT, F-75005 Paris, France

⁴DSM Nutritional Products Ltd, Nutrition Innovation Center, Basel, Switzerland

⁵CIRAD, UMR SELMET, Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux, Baillarguet TA C-112/A, F-34398 Montpellier

Corresponding author: Dolores I. Batonon. E-mail: dolores.batonon@gmail.com

Short title: Alternatives to corn and soybean meal in broilers

Abstract

A meta-analysis was conducted i) to evaluate broiler response to partial or total substitution of corn by sorghum and millet and ii) to determine the effect of soybean meal replacement by cottonseed meal in broiler diet. The database included 190 treatments from 29 experiments published from 1990 to 2013. Bird responses to an experimental diet were calculated relative to the control ones (*Experimental – Control*), and reported as δ ADFI and δ ADG and δ FCR, for Average Daily Feed Intake, Average Daily Gain and Feed Conversion Ratio respectively. Differences relative to control diet were submitted to mixed-effect models. Results showed that diets containing millet led to similar performance in all parameters as the corn-based ones while sorghum-based diets decreased growth performance. No major dose-response effect was observed with millet and cottonseed meal. No effect of the level of substitution of sorghum on feed intake was found; however, growth performance decreased when the level of substitution of corn by sorghum increased. Cottonseed meal was substituted to soybean meal up to 40% and found to increase feed intake while reducing growth performance. Young birds were not more sensitive to these ingredients than older birds since there was no negative effect of these ingredients on performance in the starter phase. Results obtained for sorghum pointed out the necessity to find technological improvements

that will increase the utilization of these feedstuffs in broiler diet. An additional work is scheduled to validate these statistical results *in vivo* and to evaluate the interactions induced with the simultaneous inclusions of sorghum, millet and cottonseed meal in broiler feeding.

Keywords: meta-analysis, broiler, sorghum, millet, cottonseed meal

Implications

As the demand in feed ingredients for poultry production is increasing, finding alternatives to corn and soybean meal utilization becomes a necessity. Conflicting results were reported in literature on the use of sorghum or millet to replace corn, and cottonseed meal as replacement to soybean meal. This study proposed quantitative knowledge of broiler response to dietary inclusion of sorghum, millet and cottonseed meal, which might lead to an increasing utilization of these feedstuffs.

Introduction

As a consequence of the consistent development of animal production, especially poultry production, there is an increasing demand for feed ingredients supplying energy and protein for poultry (Rae and Ngaya, 2010). Corn and wheat are the major cereal grains used with soybean meal in the least cost feed formulation for poultry (Rae and Ngaya, 2010; Ravindran, 2013a). The gap between local supply and demand for these major feed ingredients is expected to widen over the coming decades (Ravindran, 2013b). A strong increasing trend and a high variation of the prices of cereals grains and soybean meal have been observed in the last years (FAOSTAT, 2014). The prices volatility and changes in the availability of corn and soybean meal have spurred interest in using other feed ingredients produced in large scale (Ravindran, 2013b).

While sorghum (*Sorghum bicolor*) is the fifth major cereal produced in the world (Heuzé *et al.*, 2012a), millet (*Pennisetum glaucum*, *Setaria italica*) has been cultivated worldwide and used in animal nutrition (Heuzé *et al.*, 2012b). A protein-rich feed, cottonseed meal (*Gossypium spp.*) is a common feedstuff for animals, notably in cotton-producing areas such as India, China and USA (Heuzé *et al.*, 2013). Several studies showed the interest of using sorghum or millet as alternatives to corn, and cottonseed meal in partial replacement of soybean meal. Utilization of millet in broiler feed resulted in similar (Davis *et al.*, 2003; Hidalgo *et al.*, 2004) or improved performance (Baurhoo *et al.*, 2011) compared to corn-based

diets whereas conflicting results were reported for sorghum and cottonseed meal. Some studies showed a reduction in feed intake and weight gain in sorghum-based diets (Jacobs and Parsons, 2013) while others indicated similar performance as the control diet (Jacob *et al.*, 1996). According to some studies (Azman and Yilmaz, 2005), cottonseed meal is a suitable replacement for soybean meal, observing that poultry performance was not different between the two ingredients. However, Watkins *et al.* (1993) reported an increased feed intake with cottonseed meal, thus leading to a degraded feed conversion ratio compared to soybean meal-based diets.

Based on several studies, there is no consensus on the recommended level of substitution of these ingredients in broiler feeding. Fifty percent corn replacement with low-tannin sorghum was possible for broiler diets whereas 100% corn substitution had negative effects on the intestinal mucosa and performance (Torres *et al.*, 2013). However, broilers can be fed up to 100% low tannin sorghum-based diets with similar feed conversion ratio as the control diet (Jacob *et al.*, 1996). Proposed replacement of corn by millet ranged from 10% to 100% (Hidalgo *et al.*, 2004; Goodarzi Boroojeni *et al.*, 2011). According to Baurhoo *et al.* (2011), substitution rates of millet greater than 50% significantly improved body weight and feed conversion ratio compared to a corn-based diet while no difference was reported between 5 and 75% substitution for Davis *et al.* (2003) and Manwar and Mandal (2009). No detrimental effect on broiler performance was pointed out up to 20% soybean meal substitution by cottonseed meal in the diet (Azman and Yilmaz, 2005) whereas performance was sometimes decreased at much lower inclusion rate. Given all these contradictory results on the level of substitution effect, a dose-response impact of these feed ingredients inclusion should be therefore studied.

All the above information demonstrates that there is no clear picture of the effects of the use of sorghum, millet and cottonseed meal in poultry diet. Because results from a single classical experiment are specific to conditions under which observations were made, they cannot be the basis for a large inference space (Sauvant *et al.*, 2008). It is therefore useful to collect results from these studies and apply relevant statistical tools to allow drawing objective conclusions. Meta-analysis is a relevant statistical method to aggregate data from previous published research and to quantify knowledge (St-Pierre, 2001; Sauvant *et al.*, 2008). Thus, the objectives of this work were i) to determine whether the presence of sorghum, millet and cottonseed meal in broiler feeding will affect the performance and ii) to investigate the quantitative effect of partial or total substitution of corn with sorghum and

Table 1 Diets nutrients composition and average performance collected in sorghum, millet and cottonseed meal databases used for the meta-analysis (mean $\pm$ s.e.)

Database	Sorghum		Millet		Cottonseed meal	
Number of publications	8		5		4	
Number of experiments	12		10		7	
	Control	Exp. ¹	Control	Exp.	Control	Exp.
Starter phase	n = 40		n = 37		n = 28	
Ingredient (%)						
Corn	49.2 $\pm$ 1.4	29.2 $\pm$ 1.1	54.7 $\pm$ 1.7	30.8 $\pm$ 2.4	53.8 $\pm$ 1.0	47.5 $\pm$ 0.3
Soybean meal	36.3 $\pm$ 0.7	35.4 $\pm$ 0.6	35.9 $\pm$ 0.9	31.6 $\pm$ 0.8	33.8 $\pm$ 1.3	17.9 $\pm$ 0.8
Oil	4.7 $\pm$ 0.2	4.1 $\pm$ 0.2	2.5 $\pm$ 0.3	3.3 $\pm$ 0.2	5.0 $\pm$ 0.0	7.5 $\pm$ 0.0
Exp. feed ingredient		39.2 $\pm$ 3.2		36.6 $\pm$ 3.7		19.6 $\pm$ 0.7
ME (MJ/kg) ²	12.78 $\pm$ 0.03	12.74 $\pm$ 0.04	12.56 $\pm$ 0.12	12.46 $\pm$ 0.08	13.38 $\pm$ 0.02	13.38 $\pm$ 0.01
CP (%) ²	23.1 $\pm$ 0.2	22.7 $\pm$ 0.1	21.9 $\pm$ 0.4	21.6 $\pm$ 0.2	22.3 $\pm$ 0.3	23.2 $\pm$ 0.17
Performance						
Final BW (g)	408 $\pm$ 70	458 $\pm$ 56	522 $\pm$ 34	503 $\pm$ 18	732 $\pm$ 37	756 $\pm$ 12
ADFI (g/b/d)	35.1 $\pm$ 4.0	39.2 $\pm$ 3.2	39.0 $\pm$ 2.5	39.0 $\pm$ 1.6	58.2 $\pm$ 2.5	60.3 $\pm$ 1.1
ADG (g/b/d)	22.6 $\pm$ 3.2	24.1 $\pm$ 2.5	27.4 $\pm$ 1.2	27.2 $\pm$ 0.7	38.2 $\pm$ 2.7	39.4 $\pm$ 1.0
FCR	1.68 $\pm$ 0.10	1.73 $\pm$ 0.08	1.36 $\pm$ 0.07	1.33 $\pm$ 0.05	1.54 $\pm$ 0.08	1.54 $\pm$ 0.02
Grower phase	n = 40		n = 32		n = 19	
Ingredient (%)						
Corn	52.1 $\pm$ 1.9	19.4 $\pm$ 3.1	58.7 $\pm$ 2.4	34.8 $\pm$ 3.2	63.1 $\pm$ 2.9	57.5 $\pm$ 2.6
Soybean meal	25.1 $\pm$ 1.9	28.5 $\pm$ 1.0	31.0 $\pm$ 1.8	28.2 $\pm$ 1.0	22.2 $\pm$ 3.1	15.2 $\pm$ 2.3
Oil	3.3 $\pm$ 0.8	2.4 $\pm$ 0.3	2.7 $\pm$ 0.3	3.6 $\pm$ 0.2		
Exp. feed ingredient		54.5 $\pm$ 1.5		36.2 $\pm$ 4.1		21.3 $\pm$ 2.9
ME (MJ/kg) ²	14.4 $\pm$ 0.4	14.3 $\pm$ 0.2	12.83 $\pm$ 0.17	12.62 $\pm$ 0.10	13.40 $\pm$ 0	13.40 $\pm$ 0
CP (%) ²	20.0 $\pm$ 0.3	20.8 $\pm$ 0.3	20.0 $\pm$ 0.6	20.0 $\pm$ 0.4	20.2 $\pm$ 1.1	20.2 $\pm$ 0.7
Performance						
Final BW (g)	1952 $\pm$ 275	1700 $\pm$ 161	2026 $\pm$ 164	2007 $\pm$ 106	2663 $\pm$ 109	2492 $\pm$ 83
ADFI (g/b/d)	143 $\pm$ 15	115 $\pm$ 10	144 $\pm$ 18	135 $\pm$ 9	156 $\pm$ 3	155 $\pm$ 3.
ADG (g/b/d)	52.8 $\pm$ 6.6	47.6 $\pm$ 4.3	69.5 $\pm$ 5.3	69.8 $\pm$ 3.7	75.0 $\pm$ 1.8	71.6 $\pm$ 1.4
FCR	2.44 $\pm$ 0.18	2.36 $\pm$ 0.11	2.04 $\pm$ 0.14	1.95 $\pm$ 0.08	2.16 $\pm$ 0.08	2.17 $\pm$ 0.06
Reference ³	Douglas <i>et al.</i> , 1990; Nyachoti <i>et al.</i> , 1996; Jacob <i>et al.</i> , 1996a,b; Ayssiwede <i>et al.</i> , 2009; Kwari <i>et al.</i> , 2011; Jacobs and Parson, 2013; Torres <i>et al.</i> , 2013		Davis <i>et al.</i> , 2003; Hidalgo <i>et al.</i> , 2004; Manwar and Mandal, 2009; Baurhoo <i>et al.</i> , 2011; Goodarzi Boroogeni <i>et al.</i> , 2011		Gamboa <i>et al.</i> , 2001; Henry <i>et al.</i> , 2001; Sterling <i>et al.</i> , 2002; Azman and Yilmaz, 2005	

¹ Exp.: Experimental

² ME and CP contents are the average reported values in the publications

³ The complete list of references used for the meta-analysis is given in supplementary material S1.

millet, and partial replacement of soybean meal with cottonseed meal on performance in broiler.

Materials and methods

Description of the database

Peer-reviewed publications investigating utilization of sorghum, millet and cottonseed meal as partial or total replacement of corn and soybean meal in broiler feeding were selected from 1990 to 2013. The inclusion of these studies was based on three criteria: (i) experiments involving commercial broiler lines; (ii) experiments reporting at least two of these variables: average daily feed intake (ADFI), average daily gain (ADG) or feed conversion ratio (FCR); (iii) experiments detailing ingredients lists and basic nutritional characteristics of experimental diets. Thus, a database containing 190 treatments was established from 17 papers representing 29 experiments. For each experiment, information describing animals (line, sex, number of birds per replicate, age, BW), experimental conditions (birds housing, diet composition) and measured parameters was recorded. In publications where several experiments were reported, each experiment was identified with a separate code. The complete list of references used for the meta-analysis is given in supplementary material S1.

Calculations

Treatment average was considered as the experimental unit. Summary statistics of the data used in the study are presented in Table 1. It can be observed that all the control diets were mainly based on corn and soybean meal. Sorghum and millet were substituted to corn and cottonseed meal was used to replace soybean meal. It was observed that in the experiments contained in the database, the tested feed ingredients were included to substitute the control feedstuffs. However, to ensure similar nutrients supply, the experimental diets were formulated with changes made in other feed ingredients inclusion rates. For instance, in millet-based diets, the level of inclusion of soybean meal was reduced compared to the control diet whereas in cottonseed meal diets, the level of oil in the diet was increased. Therefore, the levels of substitution of sorghum and millet to corn and cottonseed meal to soybean meal were re-calculated according to Eq.[1].

$$Level (\%) = \frac{Exp. \text{ ingredient}}{Targeted \text{ ingredient}_{Control} + Additional \text{ ingredient}_{Control}} \times 100$$

Eq.[1]

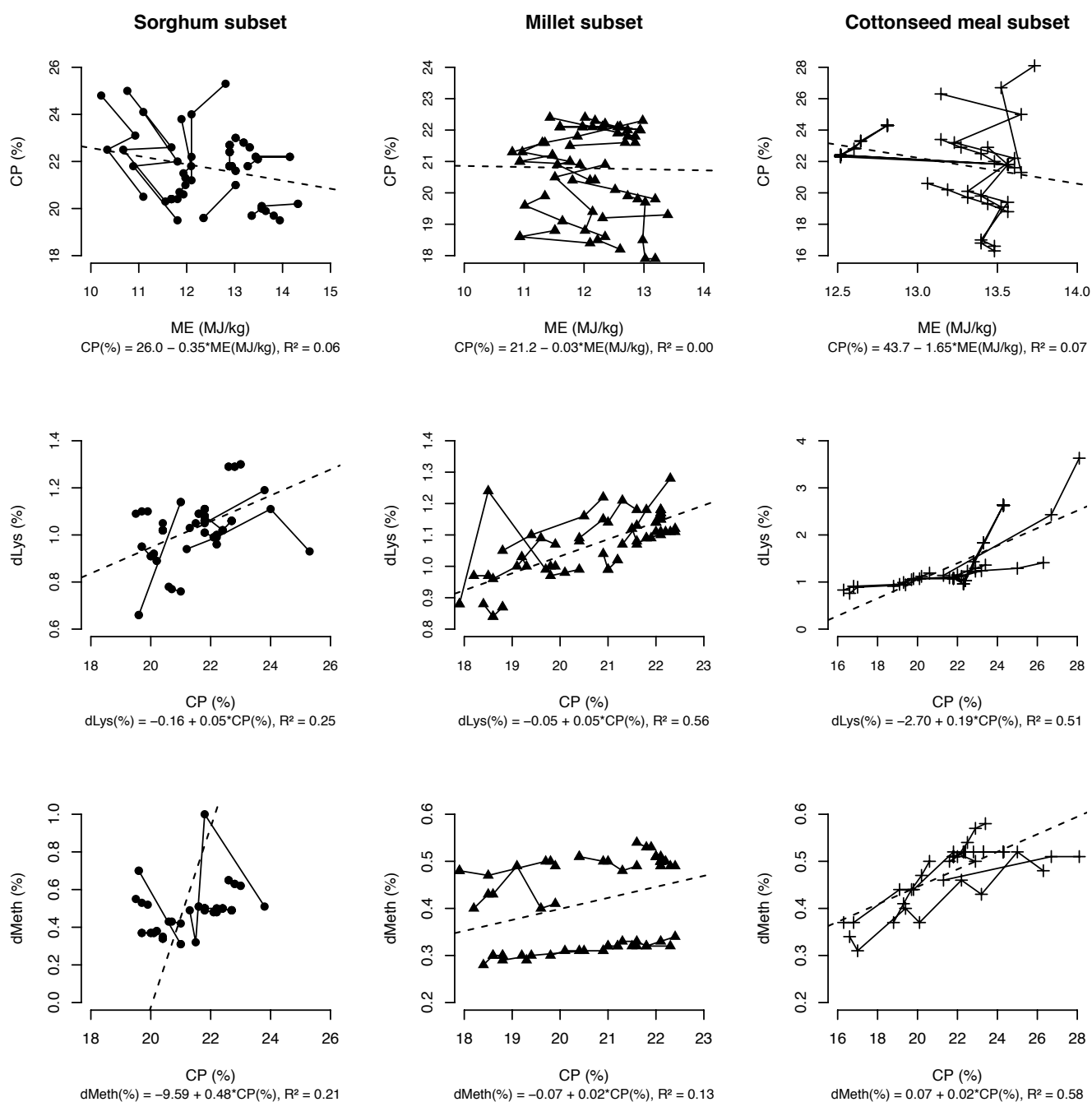


Figure 1 Relationship between the calculated ME and CP contents and CP and amino acids contents of diets used in sorghum (●), millet (▲) and cottonseed meal (+) experiments, respectively. Each point is a treatment average and observations are connected within each experiment.

with *Exp. ingredient* being the inclusion rate of sorghum, millet or cottonseed meal in the experimental diet; *Targeted ingredient_{Control}* is the level of inclusion in the control diet of corn or soybean meal; *Additional ingredient_{Control}* is the level of inclusion in the control diet of the other feed ingredients modified in the experimental diets.

Information about the feed ingredient cultivar or variety used was rarely mentioned in the publications and not all nutrients contents were given in the publications. Therefore, to ensure consistency within the database, the nutritional values (Metabolizable energy, crude protein, and amino acid) of each treatment were estimated using NRC tables of feedstuffs composition (NRC, 1994). *Sorghum bicolor* composition was chosen for treatments involving sorghum while pearl millet (*Pennisetum glaucum*) was retained for millet experiments. Nutritional composition of cottonseed meal-based diets was estimated using cottonseed meal (*Gossypium spp.*) prepressed solvent extracted, 44% protein (NRC, 1994). Calculated nutritional composition of the treatments in each experiment is illustrated Figure 1. Each point is a treatment average. Large nutritional changes have been observed between and within experiment. No relationship existed between ME and CP contents. For a similar ME content in cottonseed meal diets, different levels of CP were observed. Lysine and methionine contents were positively linked to protein level in the diet.

Production phases were coded according to experimental periods mentioned in the publications. Thus, starter phase covered data collected between 0 and 21-d old while the growing phase ranged from 21 to 42-d of age. In sorghum-based experiments, a study ranging from 29 to 57-d of age (Jacob *et al.*, 1996) was included in the growing phase. Descriptive statistics showed ADFI, ADG, final body weight and FCR varied between each ingredient database (Table 1). Bird responses to an experimental diet were calculated relative to the control as absolute values (*Experimental – Control*) or as percentages ($((\text{Experimental} - \text{Control})/\text{Control})$). These values were then reported as δADFI , δADG , δME intake and δCP intake, for ADFI, ADG, ME intake and CP intake respectively. δFCR was calculated as absolute values (*Experimental – Control*) for FCR. The advantage of using delta values is to take into account a large part of the variation existing between experiments (Table 1).

Statistical analysis

Data analyses were performed using *R version 3.0.2* (R Core Team, 2013).

The whole database was separated in three subsets of data with sorghum, millet and cottonseed meal experiments respectively. Global and within study approaches were applied and discussed according to principles reported by St-Pierre (2001). Differences relative to control diet were submitted to 1-way mixed effect model to determine whether the presence of sorghum, millet and cottonseed meal in the diets affected broiler response. δ ADFI, δ ME intake, δ CP intake, δ ADG and δ FCR were then compared to the reference value ($\delta=0.00$) of the control diet using Eq.2 in each database. An experiment effect was included in the models as a random effect in order to take into account the sources of variation (bird line, environmental conditions and measurements methods) that may exist between experiments (Sauvant *et al.*, 2008).

$$y_{ij} = \alpha_j + x_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad \text{Eq.[2]}$$

where y_{ij} is the measured variable (δ ADFI, δ ME intake, δ CP intake, δ ADG and δ FCR) for regimen i (i = control, sorghum-, millet- or cottonseed meal-based diets); j being the experiment number; α_j is the random effect for experiment j ; x_{ij} the regimen effect and ε_{ij} the residual error. Results were considered significantly different if $P < 0.05$ and tendencies were noted at $P\text{-values} \leq 0.10$.

Another aim of this study was to evaluate the effect of the level of substitution of each ingredient on broiler response. Thus, data of both starter and grower phases were combined to assess this effect on the studied parameters. A 2-way mixed effects model (Eq.[3]), including the production phase effect (starter vs. grower) was performed on delta values expressed as percentage of the control diet for sorghum, millet and cottonseed meal as follows:

$$y_{jk} = \mu + \alpha_j + \beta \text{Level}_{jk} + \text{Phase}_{jk} + \varepsilon_{jk} \quad \text{Eq.[3]}$$

with y_{jk} being the measured variable in the experiment j at the production phase k ; μ is the overall intercept with fixed effect; α_j is the random effect for experiment j on the intercept μ ; β , the coefficient of the level of substitution (*Level*); *Phase* is the production phase effect and ε_{jk} is the residual error. Distributions of random effects (α_j) and residual error (ε_{jk}) were assumed to be normal. The obtained models were evaluated using different criteria: the significance level of the estimated parameters, the coefficient of determination (R^2) and the residual variation expressed as root mean square error (RMSE). The adequacy of the mixed

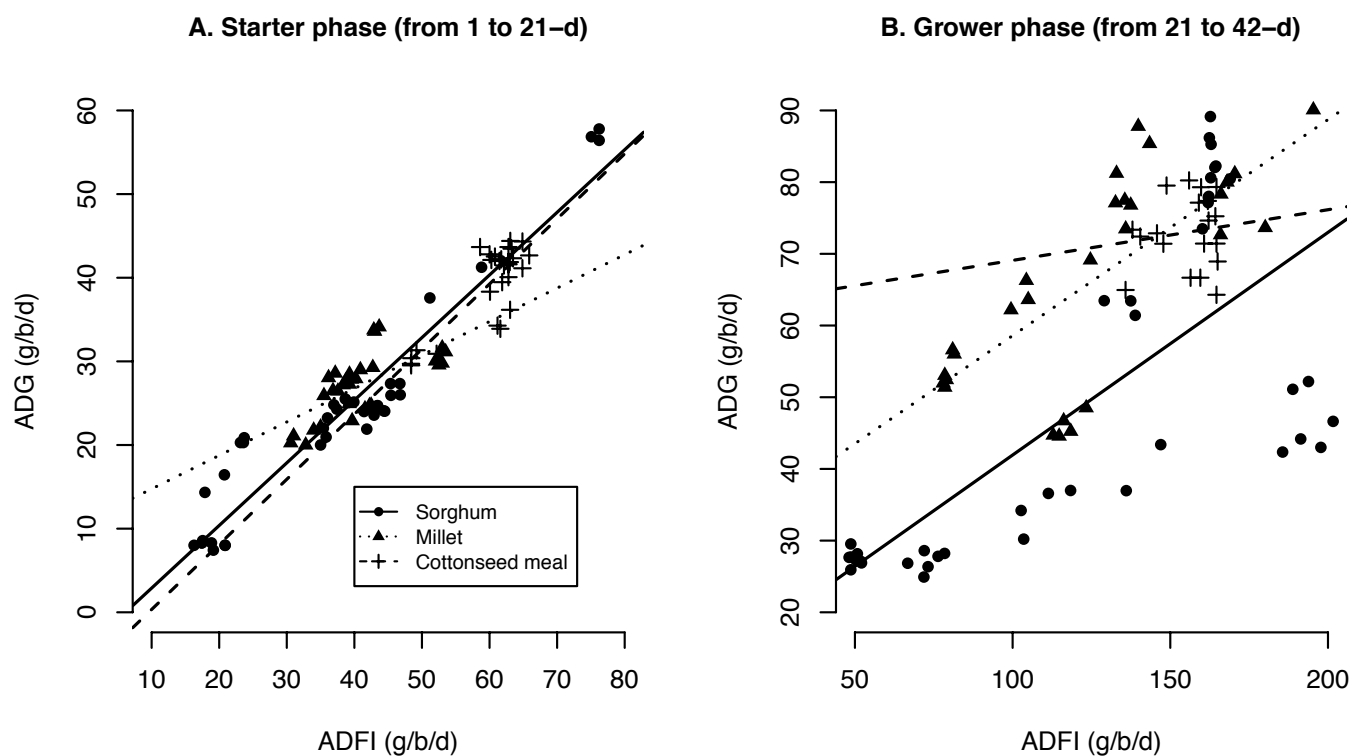


Figure 2 Average daily gain (g/b/d) as a function of average daily feed intake (g/b/d) for sorghum, millet and cottonseed meal during starter (A) and grower (B) phases.

The lines represent the linear regression between both variables. The overall adjustments for starter phase were: $ADG = -4.60 + 0.75ADFI$ ($R^2 = 0.91$) for sorghum; $ADG = 10.75 + 0.40ADFI$ ($R^2 = 0.48$) for millet; $ADG = -7.45 + 0.78ADFI$ ($R^2 = 0.69$) for cottonseed meal. Grower phase. Sorghum: $ADG = 10.87 + 0.31ADFI$ ($R^2 = 0.52$); millet: $ADG = 28.46 + 0.30ADFI$ ($R^2 = 0.64$); cottonseed meal: $ADG = 62.02 + 0.07ADFI$ ($R^2 = 0.02$). Where ADG: average daily gain (g/b/d), ADFI: average daily feed intake (g/b/d).

models performed on the response to increasing level of substitution of each ingredient (Eq.[2]) was also assessed using residuals plots (*Observed – Predicted*) against predicted values of *Y* to test for linear prediction bias (St-Pierre, 2001).

Results

Data consistency

Prior to any statistical analysis, ADG was expressed as function of ADFI in order to verify the consistency of the database (Figure 2). No clear outliers were denoted in both starter (from 1 to 21-d) and grower (from 21 to 42-d) phases. The results of the regression analysis allowed a conclusion of a relationship between ADFI and ADG, with ADFI explaining 84.3% of ADG variance in starter phase and 54.0% in the grower one. However, for millet-based diets, a lower *R*² (0.25) was obtained during starter phase. This was related to one experiment with a much lower FCR (0.85 ± 0.04) compared to what could be expected according to guidelines (1.13). These data were eliminated from other analyses with a new *R*² of 0.48. In the grower phase, sorghum data could suggest a quadratic model between ADG and ADFI; but the quadratic effect was found to be non-significant in the performed regression test.

Regressions analysis of nutritional composition showed a poor adjustment of calculated nutritional composition to reported composition. For ME content in the starter phase, the slope and the intercept were significantly different from 0, meaning that a slight relationship (*R*² = 0.31) existed between recalculated and reported ME values. The opposite was observed for the grower phase for ME content with a low *R*² (*R*² = 0.08) and the slope significantly different from 0. CP content was closer to reported data with *R*² = 0.17 and 0.56, respectively for starter and grower phases with a slope different from 0 in both cases. The reason of the differences between diets composition reported in the publications and our own calculations is probably the use of different feed tables, since the composition of ingredients was rarely analyzed by authors and reported in publications. Therefore, to ensure uniformity of information, the nutritional values used in the analyses were those calculated with NRC values.

Effect of the presence of sorghum, millet and cottonseed meal on broiler performance

Differences of performance relative to control diet were shown in terms of absolute values (*Experimental - Control*) and as percentages relatively to control (*Experimental -*

Table 2 Responses relative to control diet for feed intake, nutrients intakes and growth performance to sorghum, millet and cottonseed meal utilization

	Sorghum-based diets				Millet-based diets				Cottonseed meal-based diets			
	Mean $\pm$ se	P^1	Mean $\pm$ se	P	Mean $\pm$ se	P	Mean $\pm$ se	P	Mean $\pm$ se	P	Mean $\pm$ se	P
	(g/b/d)		(% control)		(g/b/d)		(% control)		(g/b/d)		(% control)	
δ ADFI												
Starter phase	1.23 $\pm$ 0.44	**	3.80 $\pm$ 1.21	***	-0.60 $\pm$ 0.45	ns	-1.75 $\pm$ 1.33	ns	1.95 $\pm$ 0.38	*	3.31 $\pm$ 0.64	*
Grower phase	-6.41 $\pm$ 2.54	†	-5.10 $\pm$ 1.74	†	-11.37 $\pm$ 3.84	†	-5.41 $\pm$ 2.00	†	3.75 $\pm$ 1.43	*	2.57 $\pm$ 3.26	*
δ CP intake												
Starter phase	0.23 $\pm$ 0.08	**	3.29 $\pm$ 0.97	***	-0.15 $\pm$ 0.12	ns	-1.96 $\pm$ 1.50	ns	1.49 $\pm$ 0.21	***	11.60 $\pm$ 1.57	***
Grower phase	-1.86 $\pm$ 0.58	**	-6.81 $\pm$ 1.94	**	-2.20 $\pm$ 0.86	ns	-4.12 $\pm$ 2.17	ns	2.20 $\pm$ 0.38	***	7.41 $\pm$ 1.17	***
δ ADG												
Starter phase	-0.47 $\pm$ 0.31	ns	-1.51 $\pm$ 1.33	ns	0.12 $\pm$ 0.24	ns	0.43 $\pm$ 0.89	ns	-0.14 $\pm$ 0.33	ns	-0.12 $\pm$ 0.83	ns
Grower phase	-2.31 $\pm$ 0.62	**	-5.36 $\pm$ 1.42	**	1.93 $\pm$ 1.14	ns	2.58 $\pm$ 1.57	ns	-2.96 $\pm$ 0.38	*	-3.95 $\pm$ 1.17	*
δ ME intake	(MJ/b/d)		(% control)		(MJ/b/d)		(% control)		(MJ/b/d)		(% control)	
Starter phase	0.02 $\pm$ 0.00	***	4.19 $\pm$ 1.04	***	-0.03 $\pm$ 0.01	***	-7.09 $\pm$ 1.61	**	-0.02 $\pm$ 0.06	ns	-2.29 $\pm$ 0.73	ns
Grower phase	-0.03 $\pm$ 0.03	ns	-2.28 $\pm$ 1.98	ns	-0.24 $\pm$ 0.06	*	-10.57 $\pm$ 2.15	**	0.01 $\pm$ 0.02	ns	0.64 $\pm$ 0.90	ns
δ FCR												
Starter phase	0.09 $\pm$ 0.02	***			-0.03 $\pm$ 0.02	ns			0.05 $\pm$ 0.01	ns		
Grower phase	0.01 $\pm$ 0.03	ns			-0.15 $\pm$ 0.07	ns			0.09 $\pm$ 0.05	ns		

δ ADFI and δ ADG are differences relative to control diets expressed in absolute values (*Experimental – Control*) or as percentages of the control (*((Experimental – Control)/Control)*) respectively in average daily feed intake (ADFI) and average daily gain (ADG). δ FCR was expressed relative to the control in absolute value for feed conversion ratio (FCR).

¹A one-way mixed effect model was performed in each database to determine whether the presence of sorghum, millet and cottonseed meal in the diets affected broiler's response. P is the probability of δ ADFI, δ ME intake, δ CP intake, δ ADG and δ FCR to be different from the reference value ($\delta=0.00$) of the control diet.

*** $P < 0.001$; ** $P < 0.01$; * $P < 0.05$; † $P \leq 0.10$. ns: not significant at $P > 0.10$.

Control)/Control). No difference was observed in the statistical analyses for absolute values or percentages. Therefore, the results are discussed only as percentage of the control diet.

Starter phase (from 1 to 21-d). Sorghum-based diets and cottonseed meal-based diets significantly increased ADFI compared to the control diet with about +3.80% and +3.31%, respectively. With millet-based diets, similar feed intake as the control diets was observed (Table 2). ME intake was however reduced (-7.09%) while the opposite was observed with sorghum-based diets (+4.19%). No difference of ME intake was observed between the control diets and cottonseed meal-based diets. An increase of CP intake was observed when birds were fed with sorghum-based diets and cottonseed meal-based diets in replacement of corn- or soybean meal-based diets respectively. CP intake was similar among experimental treatments fed millet and those receiving the control diets. No effect of the feed ingredient was observed on growth rate since similar ADG were obtained between control and experimental diets with all three feed ingredients. Birds offered sorghum-based diets increased FCR by 0.09 compared to those fed corn-based diets. Average values obtained for δ FCR showed no significant difference between control diet and millet-based diets or cottonseed meal-based diets.

Grower phase (from 21 to 42-d). During the grower phase, differences relative to the control diet in each experiment showed that millet-based diets tended to reduce ADFI ($P=0.10$) but did not impact ADG. ADG was found to be lower in sorghum-based diets (-5.36%) compared to the control whereas a trend was observed for ADFI ($P = 0.05$). Birds fed cottonseed meal-based diets increased ADFI by 2.57% while reducing ADG by 3.95% compared to the control. No significant effect of cottonseed meal and sorghum was found on ME intake contrary to millet, which decreased ME intake (-10.57%). CP intake was not affected by millet, but it was affected by sorghum (-6.81%) and cottonseed meal (+7.41%). None of the tested ingredients significantly affected feed conversion ratio during this phase.

Broiler response to an increasing level of substitution

Observed δ ADFI, δ ADG and δ FCR versus level of substitution are presented Fig. 3. No linear inter-study effect seems to exist between the level of substitution and any of the performance criteria studied. However, a substantial variation in the response could be

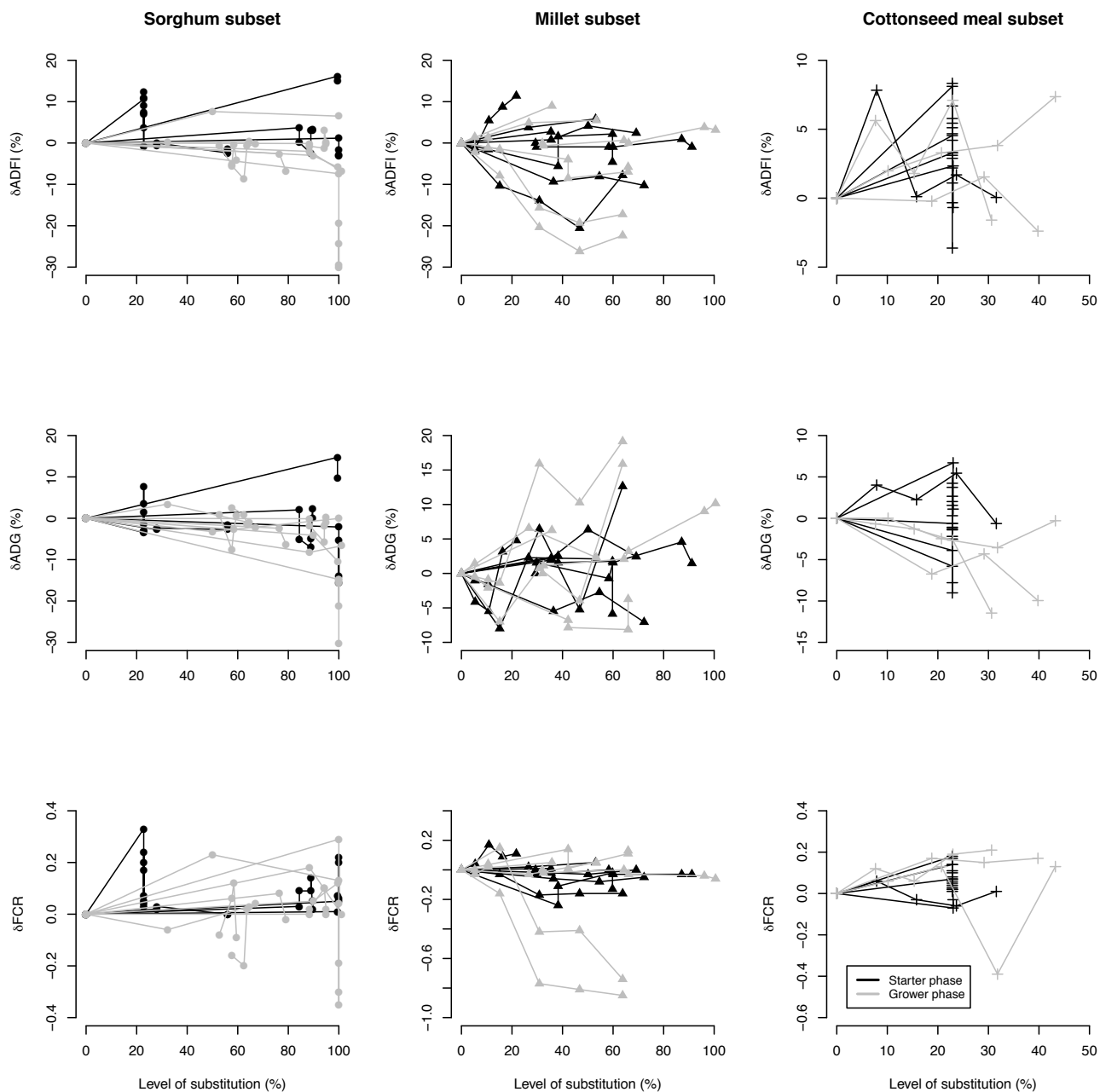


Figure 3 Global and within study responses of $\delta ADFI$, δADG and δFCR to an increasing level of substitution of sorghum (●), millet (▲) and cottonseed meal (+) for starter phase and grower phase.

Observations belonging to one trial are connected with a solid line.

observed across trials. Apparently, no difference seems to exist between starter and grower phase for all criteria.

Parameter estimates for Eq.[2] are reported in Table 3. In sorghum database, no significant effect of the level of substitution was observed on δ ADFI and δ FCR. However, growth performance consistently decreased when the level of substitution of corn by sorghum increased. The regressions analysis also showed that the only major relationship existed between the level of substitution of sorghum and the growth rate ($R = 0.18$). No difference was found for δ ADFI and δ ADG between the starter and the grower phase except for δ FCR, which tended to be higher in the starter than in the grower phase ($P = 0.06$).

The level of substitution of corn by millet significantly impacted δ ADFI, δ ADG. A reduction of ADFI was observed with the increasing level of millet in broiler feeding while the opposite was obtained for δ ADG. However the lower R ($R = 0.03$ and $R = 0.08$, respectively for δ ADFI and δ ADG) indicated the lack of strong linear relationship between the level of substitution and these two criteria of performance. No influence of the level of substitution of millet on δ FCR was observed. These conclusions were similar in starter and grower phases since no effect of the production phase was observed on all the performance criteria studied. For cottonseed meal diets, a significant impact of the level of substitution was obtained on δ ADFI and δ ADG but it did not influence δ FCR. δ ADG was affected by the production phase and found significantly higher in the grower phase. Lower values of RMSE (Root Mean Square Error) were observed for all criteria for sorghum, millet and cottonseed meal databases thus leading to a conclusion of a good accuracy of the fitted models.

Model evaluation

The residuals vs. predicted values for all mixed models performed on the response to level of substitution are presented in Figure 4. No obvious patterns are evident in the plots. However, the slight deviation from the solid line (*Observed = Predicted*) observed in sorghum and millet indicated a small difference between observed and predicted values. Better predictions were obtained with cottonseed meal models, since both solid regressions and dashed lines cannot be distinguished. Despite some largest residuals observed in all ingredients, the lack of correlation ($R^2 \approx 0$) indicated a fairly good prediction of δ ADFI, δ ADG and δ FCR. Overall, all of the intercepts obtained from the regressions analysis were significantly similar to 0 ($P > 0.10$) and the slope, almost null ($P > 0.10$), thus confirming the above mentioned results of the level of substitution on performance.

Table 3 Parameter estimates obtained from the mixed effects models (Eq.[2]) describing the responses in δ ADFI, δ ADG and δ FCR as a function of level of substitution and the production phase for sorghum-, millet- and cottonseed meal-based diets

	Sorghum-based diets			Millet-based diets			Cottonseed meal-based diets		
	Coefficient	s.e.	P^1	Coefficient	s.e.	P	Coefficient	s.e.	P
δ ADFI (% control) ²									
Intercept	1.20	2.08	ns	-0.09	2.35	ns	0.60	0.91	ns
Level effect	-0.06	0.03	ns	-0.08	0.04	*	0.06	0.04	*
Phase effect			ns			ns			ns
Level x Phase			**			ns			ns
R ²		0.08			0.03			0.11	
RMSE		5.66			6.11			2.73	
δ ADG (% control) ²									
Intercept	1.36	1.74	ns	-1.19	1.56	ns	-0.06	1.05	ns
Level effect	-0.07	0.02	***	0.09	0.03	**	-0.16	0.05	*
Phase effect			ns			ns			*
Level x Phase			*			ns			ns
R ²		0.18			0.08			0.09	
RMSE		4.74			4.83			3.15	
δ FCR ³									
Intercept	0.00	0.03	ns	0.00	0.06	ns	0.02	0.03	ns
Level effect	0.00	0.00	ns	0.00	0.00	ns	0.00	0.00	†
Phase effect			†			ns			ns
Level x Phase			ns			ns			ns
R ²		0.00			0.05			0.06	
RMSE		0.10			0.17			0.09	

R²: given for the relationship between the variable of interest and the level of substitution. RMSE: Root mean square error.

¹ A 2-way mixed effect model including the production phase effect as co-variable and the experiment as random effect was performed on delta values from each database to determine the effect of the level of substitution on broiler's response. ² δ ADFI, δ ADG and are differences relative to control diets ($(Experimental - Control)/Control$) respectively in average daily feed intake (ADFI), average daily gain (ADG) and feed conversion ratio (FCR). ³ δ FCR was expressed relative to the control in absolute value ($Experimental - Control$) for feed conversion ratio (FCR).*** $P < 0.001$; ** $P < 0.01$; * $P < 0.05$; † $P \leq 0.10$. ns: not significant at $P > 0.10$.

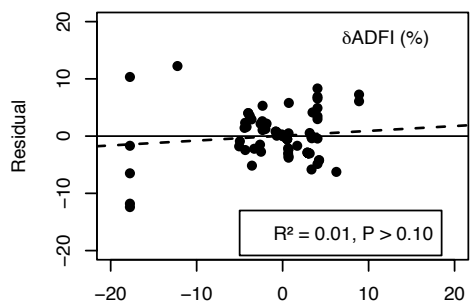
Discussion

The objective of the current study was to evaluate the effects of partial or total substitution of corn by sorghum and millet and the effect of soybean meal replacement by cottonseed meal on broiler performance. Results obtained indicated that millet can partially or totally replace corn in broiler feeding without any detrimental effect on performance and this is consistent with several authors (Davis *et al.*, 2003; Hidalgo *et al.*, 2004). No significant difference in feed intake and growth performance were observed with millet-based diets when compared to corn-based diets. However, numerical differences were observed with ADFI, which tended to be lower in millet-based diets. Despite the slight reductions of feed intake and ME intake, birds fed millet-based diets have similar growth performance to corn-based diets. This could be related to the well-balanced amino acid profile of pearl millet grains as well as the high essential amino acid concentrations and the high digestibility rate of these amino acids (Yin *et al.*, 2002; Adeola and Orban, 1995).

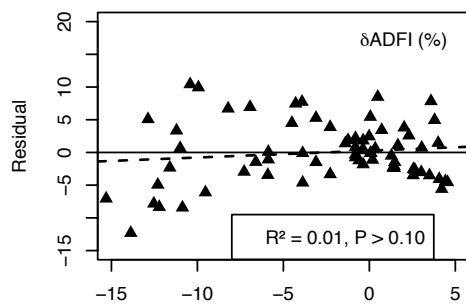
Sorghum and cottonseed meal affected broiler performance in agreement with previous works (Watkins *et al.*, 1993; Kwari *et al.*, 2011). An increase in ADFI was obtained with cottonseed meal-based diets compared to control ones in both starter and grower phases. Since cottonseed meal-based diets were lower in calculated ME content ($\delta\text{ME} = -0.73 \pm 0.07 \text{ MJ/kg}$ and $\delta\text{ME} = -0.25 \pm 0.05 \text{ MJ/kg}$, in starter and grower phases respectively), birds adjust their consumption to satisfy energy requirements (Pérez-Bonilla *et al.*, 2012). Conversely, the reduction of ADFI observed with sorghum-based diets in the grower phase was associated with the higher energy level of these diets ($\delta\text{ME} = +0.35 \pm 0.07 \text{ MJ/kg}$) compared to the control diets ($P < 0.05$). During the starter phase, a higher consumption was observed with sorghum-based diets and was associated with the sorghum particle size in these experiments. Whole and coarse ground sorghum was offered to birds and found to increase feed intake in comparison with finer particles (Jacobs and Parsons, 2013). As reported by Nir *et al.* (1990), bird has a preference for larger particles and this preference increases with age.

Growth performance was reduced in sorghum- and cottonseed meal-based diets in the grower phase and this agreed with the reports of Ojewola *et al.* (2006) and Jacobs and Parsons (2013). This might be related to the content of anti-nutritional factors of both sorghum and cottonseed meal. Tannins and phytate in sorghum are known to form complexes with protein and carbohydrates, particularly with starch (Selle *et al.*, 2010), thus leading to a

Sorghum subset



Millet subset



Cottonseed meal subset

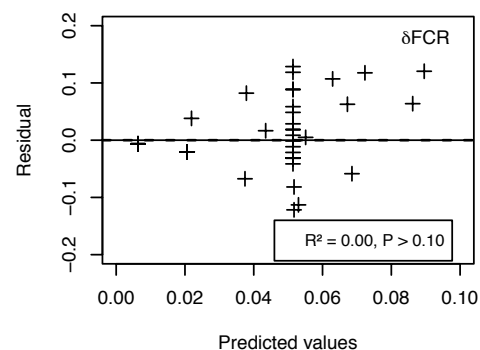
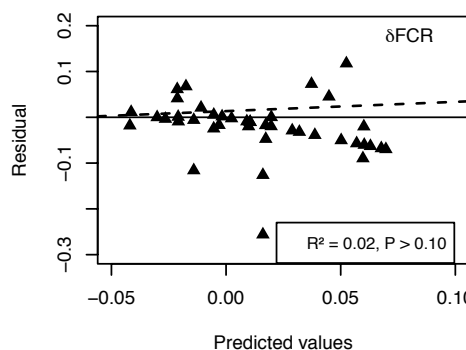
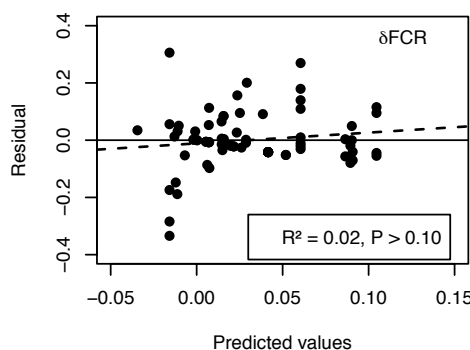
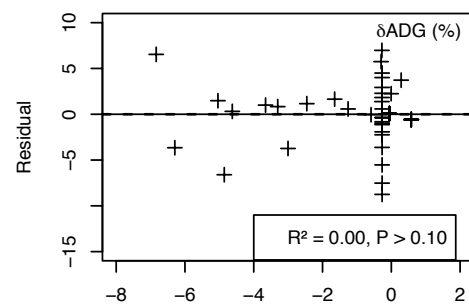
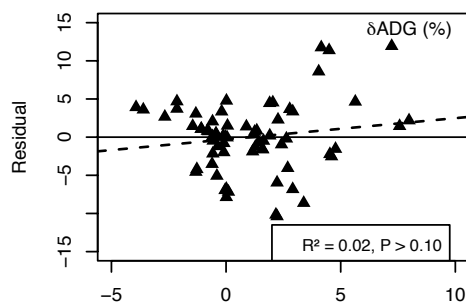
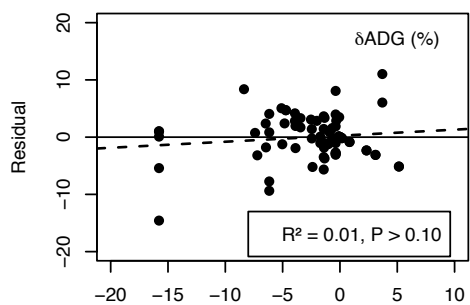
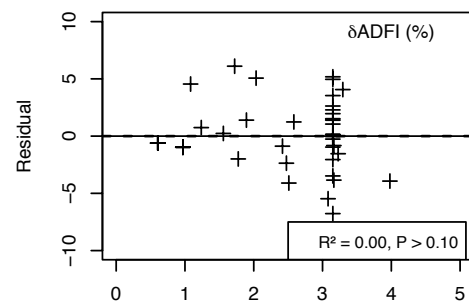


Figure 4 Plots of the Residual (observed - predicted) vs. predicted values of the mixed effects models (Eq.[2]) for sorghum- (●), millet- (▲) and cottonseed meal- (+) based diets.

Dashed lines represent the linear adjustment of residuals to predicted values.

reduction of nitrogen and starch digestibility (Mahmood *et al.*, 2014). In addition, the effect of tannin on bird's performance depends on its dietary level and the amount of feed ingested. Birds fed high tannin diets suffered from a severe decrease of growth compared to low tannin or control fed birds (Mahmood *et al.*, 2006). In cottonseed meal, free gossypol binds to lysine and reduces the lysine available for absorption (Henri *et al.*, 2001). This component also inhibits the activity of pepsin and trypsin in gastro-intestinal tract, thereby reducing the digestibility of protein and growth in broilers (Nagalakshmi *et al.*, 2007). Bird's tolerance to free gossypol depends on their age, protein content and quality, duration of feeding and presence of minerals especially the iron content in the diet. According to Panigrahi and Morris (1991), significant improvements of feed intake and egg production were obtained when laying hens were given iron treated cottonseed meal-based diets. Therefore, increasing protein or amino acid in the diet was shown to overcome the deleterious effects of tannins and gossypol (Nagalakshmi *et al.*, 2007). Since iron was not included in cottonseed meal-based diets of this meta-analysis, its utilization in broiler diet can be a way to improve the performance. Phytase supplementation can also be suggested to enhance amino acid digestibility in sorghum-based diets (Selle *et al.*, 2010).

Overall, no significant differences were observed regarding the influence of millet-based diets and cottonseed meal-based on δ FCR. Though, numerical reductions of FCR were obtained with millet-based diets in agreement with Baurhoo *et al.* (2011) and Goodarzi Boroojeni *et al.* (2011) and in line with the reduced feed intake observed in both starter and grower phases. A greater CP digestibility and the changes in the small intestine mucosa morphology were reported to be the factors leading to a better efficiency with millet utilization (Baurhoo *et al.*, 2011; Goodarzi Boroojeni *et al.*, 2011). On the contrary, feed efficiency was reduced with sorghum-based diets in starter phase accordingly with the higher consumption observed for equivalent growth performance as the corn-based diets.

Only a few differences (δ ADG and δ FCR) were observed in starter phase compared to the grower phase for sorghum-based diets and cottonseed meal-based diets. There is no evidence of cumulative effect of gossypol or tannins in the literature; therefore, it can be hypothesized that the effect of sorghum and cottonseed meal observed in the grower phase is related to specific conditions (e.g. feed formulation) of the set of experiments selected in this production phase rather than a specific age dependent effect. The lack of negative effect in starter phase does not justify restricting the use of these ingredients in younger birds.

The fitted models showed a very weak linear relationship between the level of substitution and the investigated criteria of performance. Although a significant effect of the level of substitution on δ ADFI and δ ADG was obtained with millet- and cottonseed meal-based diets, low R and slopes were determined. Based on these models, an average substitution of 33% of corn by millet for example would result in an increase of ADG of 1.78% while soybean meal replacement by 17% of cottonseed meal would decrease growth performance by 2.78%. It could then be hypothesized that no strong effect of the level of substitution was observed in millet-based diets and cottonseed meal-based diets, consistently with Davis *et al.* (2003) and Manwar and Mandal (2009). However in sorghum-based diets, a negative correlation ($R = 0.18$) and high p -value were observed regarding the effect of the level of substitution of this feed ingredient on growth performance. This is in line with Kwari *et al.* (2011) and Torres *et al.* (2013) who demonstrated that higher substitution levels of corn by sorghum decreased growth performance. These results might be explained by a dose-response effect of the anti-nutritional factors present in sorghum (phytate or tannins). Accumulation of phytate and tannins in the diet could dramatically depress protein digestion and thereby decrease protein synthesis for growth (Selle *et al.*, 2010).

Variability in bird response to utilization of these feed ingredients was observed, suggesting that this is related to some unknown factors not considered in this analysis. Given that environmental conditions affected bird's response (Syafwan *et al.*, 2012), information about temperature and relative humidity throughout the experiments could enhance the models' precision. In starter and grower phase, the intake of cottonseed meal-based diets increased with the level of substitution. At the same level of substitution, a wide variability was also observed and related to different experiments (Khalid *et al.*, 2000) involving extruded cottonseed meal supplemented or not with amino acids. This variability in bird response could also be explained by the dietary level of anti-nutritional factors (Mahmood *et al.*, 2006), since no such information was detailed in the selected publications. Furthermore, taking the experiment effect as a fixed effect in a Generalized Linear Model, as suggested by Sauvante *et al.* (2008) in case of heterogeneity between studies resulted in similar results like those obtained with the mixed effect models.

This meta-analytical approach provides significant quantitative knowledge to the utilization of these ingredients in both starter and grower phases. Cottonseed meal-based diets were given upon 40% of substitution and found to increase feed intake while reducing growth performance. Analyses showed that diets containing millet produced similar

performance as the corn-based diets while sorghum-based diets decreased growth performance. No major dose-response effect was observed with millet and cottonseed meal whereas with sorghum-based diets, a negative relationship was pointed out between the level of substitution of sorghum and growth performance. This study highlighted the necessity to find technological improvements that will lead to an increased utilization of these alternative feedstuffs, especially sorghum in poultry. However in this investigation, information on environmental conditions throughout experiments, feedstuff varieties or anti-nutritional factors contents was not available and therefore these variables as such could not be included as factors in the analysis. This may be considered as a limiting factor to the present study. Thus, in order to evaluate the accuracy of the obtained models, two trials were conducted with sorghum, millet and cottonseed meal. The potential interactions that might be induced with the simultaneous inclusion of these ingredients on broiler performance and nutrients digestibility were also assessed. Results of these trials are presented in a separate paper.

References

- Adeola O and Orban JI 1995. Chemical composition and nutrient digestibility of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) fed to growing pigs. *Journal of Cereal Science*, 22, 177-184.
- Azman MA and Yilmaz M 2005. The growth performance of broiler chicks fed with diets containing cottonseed meal supplemented with lysine. *Revue de Médecine Vétérinaire* 156, 104-106.
- Davis AJ, Dale NM and Ferreira FJ 2003. Pearl millet as an alternative feed ingredient in broiler diets. *Journal of Applied Poultry Research* 12, 137-144.
- Baurhoo N, Baurhoo B, Mustafa AF and Zhao X 2011. Comparison of corn-based and Canadian pearl millet-based diets on performance, digestibility, villus morphology, and digestive microbial populations in broiler chickens. *Poultry Science* 90, 579-586.
- FAOSTAT 2014. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAOSTAT database. Retrieved 8th august 2014 from <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/P/PP/E>.
- Goodarzi Boroojeni F, Samie AH, Edriss MA, Khorvash M, Sadeghi G, Van Kessel A and Zentek J 2011. Replacement of corn in the diet of broiler chickens using foxtail millet produced by 2 different cultivation strategies. *Poultry Science* 90, 2817-2827.
- Henry MH, Pesti GM, Bakalli R, Lee J, Toledo RT, Eitenmiller RR and Phillips RD 2001. The performance of broiler chicks fed diets containing extruded cottonseed meal supplemented with lysine. *Poultry Science* 80, 762-768.
- Heuzé V, Tran G and Lebas F 2012b. Sorghum grain. *Feedipedia.org*. A programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO. Retrieved on 8th august 2014 from <http://www.feedipedia.org/node/224>.

- Heuzé V and Tran G 2012b. Pearl millet (*Pennisetum glaucum*) grain. Feedipedia.org. A programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO. Retrieved on 8th august 2014 from <http://www.feedipedia.org/node/724>.
- Heuzé V, Tran G, Bastianelli D, Hassoun P, Lebas F 2013. Cottonseed meal. Feedipedia.org. A programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO. Retrieved on 8th august 2014 from <http://www.feedipedia.org/node/550>.
- Hidalgo MA, Davis AJ, Dale NM and Dozier III WA 2004. Use of whole pearl millet in broiler diets. *Journal of Applied Poultry Research* 13, 229-234.
- Jacob JP, Mitaru BN, Mbugua PN, Blair R 1996. The effect of substituting Kenyan Serena sorghum for maize in broiler starter diets with different dietary crude protein and methionine levels. *Animal Feed Science Technology* 61, 27-39.
- Jacobs C and Parsons CM 2013. The effects of coarse ground corn, whole sorghum, and a prebiotic on growth performance, nutrient digestibility, and cecal microbial populations in broilers fed diets with and without corn distillers dried grains with solubles. *Poultry Science* 92, 2347-2357.
- Khalid MF, Alam MZ, Ahmad F and Mahmood S 2000. Use of cotton seed meal in broiler rations formulated on the basis of total versus digestible amino acids starter phase. *International Journal of Agriculture and Biology* 2, 346-347.
- Kwari ID, Diarra SS, Saleh B, Bovoa PR, Ramat OA and Tochukwu D 2011. Growth, hematology and serology of broiler chickens fed different cultivars of sorghum as replacement for maize in the semi-arid zone of nigeria. *International Journal of Poultry Science* 10, 608-612.
- Mahmood S, Khan MA, Sarwar M and Nisa M 2006. Chemical treatments to reduce antinutritional factors in salseed (*Shorea robusta*) meal: Effect on nutrient digestibility in colostomized hens and intact broilers. *Poultry Science* 85, 2207-2215.
- Mahmood S, Ali H, Ahmad F and Iqbal Z 2014. Estimation of tannins in different sorghum varieties and their effects on nutrient digestibility and absorption of some minerals in caged white leghorn layers. *International Journal of Agriculture and Biology* 16, 217-221.
- Manwar SJ and Mandal AB 2009. Effect of high moisture storage of pearl millet (*Pennisetum typhoides*) with or without feed enzymes on growth and nutrient utilization in broiler chickens. *Animal Science Journal* 80, 438-445.
- Nagalakshmi D, Rama Rao SV, Panda AK and Sastry VRB 2007. Cottonseed meal in poultry diets: a review. *The Journal of Poultry Science* 44, 119-134.
- Nir I, Melcion JP and Picard M 1990. Effect of particle size of sorghum grains on feed intake and performance of young broilers. *Poultry Science*, 69, 2177-2184.
- NRC 1994. Nutrient requirements of poultry. National Academic Press, Washington, DC USA.
- Ojewola GS, Ukachukwu SN and Okulonye EI 2006. Cottonseed meal as substitute for soyabean meal in broiler ration. *International Journal of Poultry Science* 5:4, 360-364.

- Panigrahi S and Morris TR 1991. Effects of dietary cottonseed meal and iron-treated cottonseed meal in different laying hen genotypes. *British Poultry Science* 32, 167-184.
- Pérez-Bonilla A, Novoa S, García J, Mohiti-Asli M, Frikha M and Mateos GG 2012. Effects of energy concentration of the diet on productive performance and egg quality of brown egg-laying hens differing in initial body weight. *Poultry Science* 91, 3156-3166.
- Rae A and Ngaya R 2010. Trends in consumption, production, and trade in livestock and livestock products. In *Livestock in a changing landscape: Drivers, consequences and responses*, Vol 1 (eds H Steinfeld, HA Mooney, F Schneider and LE Neville), pp. 11-33. Island Press, Washington, DC, USA.
- Ravindran V 2013a. Main ingredients used in poultry feed formulations. In *Poultry development review* (eds FAO), pp 67-69. FAO, Retrieved on 8th august 2014 from www.fao.org/publications.
- Ravindran V 2013b. Alternative feedstuffs for use in poultry feed formulations. In *Poultry development review* (eds FAO), pp 72-75. FAO, Retrieved on 8th august 2014 from www.fao.org/publications.
- R Core Team. 2013. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Sauvant D, Schmidely P, Daudin JJ and St-Pierre NR 2008. Meta-analyses of experimental data in animal nutrition. *Animal* 2, 1203-1214.
- Selle PH, Cadogan DJ, Li X and Bryden WL 2010. Review: Implications of sorghum in broiler chicken nutrition. *Animal Feed Science and Technology* 156, 57-74.
- St-Pierre NR 2001. Invited review: integrating quantitative findings from multiple studies using mixed model methodology. *Journal of Dairy Science* 84, 741-755.
- Syafwan SG, Wermink JD, Kwakkel RP and Verstegen MWA 2012. Dietary self-selection by broilers at normal and high temperature changes feed intake behavior, nutrient intake, and performance. *Poultry Science* 91, 537-549.
- Torres KAA, Pizauro Jr. JM, Soares CP, Silva TGA, Nogueira WCL, Campos DMB, Furlan RL and Macari M 2013. Effects of corn replacement by sorghum in broiler diets on performance and intestinal mucosa integrity. *Poultry Science* 92, 1564-1571.
- Watkins SE, Skinner JT, Adams MH and Waldrup PW 1993. An evaluation of low-gossypol cottonseed meal in diets for broiler chickens 1. Effect of cottonseed meal level and lysine supplementation. *Journal of Applied Poultry Research*, 2, 221-226.
- Yin YL, Gurung NK, Jeaurond EA, Sharpe PH and de Lange CFM 2002. Digestible energy and amino acid contents in Canadian varieties of sorghum, pearl millet, high-oil corn, high-oil-high-protein corn and regular corn samples for growing pigs. *Canadian Journal of Animal Science*, 82, 385-391.

Publication 3 :

Deux expérimentations ont été réalisées pour valider *in vivo* les résultats statistiques obtenus avec la méta-analyse d'une part et évaluer les effets de ces trois ingrédients utilisés séparément ou simultanément sur les performances et la digestibilité chez le poulet de chair⁴.

Dans l'expérience 1, 486 poulets ont reçu 9 traitements : l'aliment témoin à base de maïs, blé et de tourteau de soja ; 3 aliments à base de sorgho (S) dans lesquels la part de maïs a été progressivement remplacée dans des proportions de 30, 45 et 60% ; 2 aliments à base de tourteau de coton (CM) apporté en substitution du tourteau de soja à 15 et 40 % et 3 autres aliments qui combinaient les 2 matières premières respectivement à 30 % S and 40 % CM, 45 % S and 25 % CM; 60 % S and 15 % CM. Les résultats ont montré que la substitution du maïs par du sorgho induit un indice de consommation supérieur à ce qui est observé avec un aliment à base de maïs et de soja. Aucune incidence négative n'a été obtenue avec le tourteau de coton lorsqu'il est incorporé seul ou en combinaison avec le sorgho dans l'aliment du poulet. Par ailleurs, aucun effet dose-réponse n'a été mis en évidence. Par conséquent, la question se posait de savoir s'il était possible d'incorporer plus de 60 % de sorgho dans l'alimentation du poulet. En outre, étant donné que le millet ne contient aucun facteur antinutritionnel connu, contrairement au sorgho, son incorporation totale à la place du maïs a été également évaluée dans une seconde expérience avec un regard particulier sur les interactions qui peuvent exister lorsque sorgho et millet sont utilisés simultanément dans les mêmes régimes.

Dans l'expérience 2, 540 poulets ont été répartis en plusieurs traitements : un aliment témoin différent de celui de l'Exp. 1 ; les aliments à base de sorgho (S60, S80, S100) ; les aliments à base de millet (M60, M80, M100) ou les aliments dans lesquels les deux matières premières sont apportées simultanément (S30/M30, S40/M40, S50/M50). Cette expérience a permis de montrer que le sorgho et le millet peuvent être utilisés en remplacement du maïs jusqu'à 100 % sans aucun effet négatif sur les performances.

⁴ Un deuxième article a été rédigé et soumis en complément de celui sur la méta-analyse dans la revue *Animal*.

Simultaneous inclusion of sorghum and cottonseed meal or millet in broiler diets: effects on performance and nutrient digestibility

D. I. Batonon^{1,2}, D. Bastianelli³, P. Lescoat⁴, G. M. Weber⁵, M. Umar Faruk²

¹INRA, UR83 Recherches Avicoles, F-37380 Nouzilly

²Research Centre for Animal Nutrition and Health, DSM Nutritional Products France, Saint Louis, France

³CIRAD-SELMET, Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux, Baillarguet TA C-112/A, F-34398 Montpellier

⁴AgroParisTech, UMR 1048 SADAPT, F-75005 Paris, France

⁵DSM Nutritional Products Ltd, Nutrition Innovation Center, Basel, Switzerland

Corresponding author: Dolores I. Batonon. E-mail: dolores.batonon@gmail.com

Short title: Sorghum, millet and cottonseed meal in broilers

Abstract

Two experiments were conducted to investigate the use of sorghum, cottonseed meal and millet in broiler diets, and their interaction when they are used simultaneously. In experiment 1, a control diet was compared to eight experimental treatments based on low tannin sorghum (S30, S45, S60), cottonseed meal (CM15, CM40) or both ingredients included in the same diet (S30/CM40, S45/CM25, S60CM15). Results showed that weight gain was not affected by the inclusion of sorghum or cottonseed meal. However, feed intake tended to be affected by the cereal type with the highest values with sorghum-based diets. Feed conversion ratio increased with sorghum-based diets compared to the control diet whereas a combination of cottonseed meal and sorghum in the same diet did not affect feed conversion ratio. Significant differences were observed in apparent ileal digestibility of protein and energy with the cottonseed meal- and sorghum/cottonseed meal-based diets having lower protein and energy digestibility than corn-based diets. In experiment 2, a control diet was compared to six diets where the corn was substituted at 60, 80 or 100% by either sorghum or millet and three diets with simultaneous inclusion of these two ingredients (S30/M30, S40/M40, S50/M50). Simple or combined utilization of sorghum and millet resulted in similar feed intake and growth performance as the control diet. Apparent ileal digestibility of protein

and energy was higher with millet-based diets. Faecal digestibility of protein in sorghum- and millet-based diets tended to decrease linearly with the increasing level of substitution. Sorghum-based diets resulted in lower faecal digestibility of fat compared to millet- and sorghum/millet-based diets. Higher faecal digestibility of starch were obtained with the control diet and millet-based diets compared to the sorghum-based treatments. The results obtained in the two experiments suggest that the level of substitution of sorghum, millet or cottonseed meal did not influence broiler performance. Though, it was shown that nutrient digestion can be affected with these feed ingredients.

Keywords: broiler, sorghum, millet, cottonseed meal, digestibility

Implications

Sorghum, millet and cottonseed meal can be used in poultry nutrition as replacement to corn and soybean meal. Results showed that the overall performance is not affected when high quality ingredients (low tannin, low gossypol) are used. Some effects on feed intake and feed efficiency were identified and discussed. This study gives sufficient knowledge to characterize these feed ingredients and to improve their utilization in commercial poultry sector.

Introduction

The worldwide competitiveness of the poultry industry requires finding alternatives to major feed ingredients used in broiler feeding to reduce the cost of feeding. Sorghum (*Sorghum bicolor*) and millet (*Pennisetum glaucum*, *Panicum miliaceum*) have been widely investigated in broiler nutrition as substitutes to corn whereas cottonseed meal (*Gossypium spp.*) as a possible alternative to replace soybean meal. Results indicated that similar (Davis *et al.*, 2003; Hidalgo *et al.*, 2004) or improved performance (Baurhoo *et al.*, 2011) was obtained with millet-based diets compared to corn-based diets. Whereas for sorghum and cottonseed meal, a reduction of growth performance (Jacobs and Parsons, 2013) or equivalent performance as the control diet were obtained (Jacob *et al.*, 1996; Azman and Yilmaz, 2005).

In a meta-analysis on the use of these feed ingredients (Batonon *et al.*, under review), we showed that millet-based diets produced similar performance as the corn-based diets while cottonseed meal-based diets increased feed intake. Average daily gain was reduced with both sorghum- and cottonseed meal-based diets. However, analyses revealed that no strong dose-response effect was observed with millet and cottonseed meal. No effect of the

Table 1 Analyzed composition of sorghum (S), cottonseed meal (CM) and millet (M)

	Sorghum	Cottonseed meal	Millet
Analyzed composition (g/kg, as fed)			
Dry matter	864	920	869
Crude protein	82.8	402	116
Crude fat	35.2	25.0	45.2
Starch	631	8.70	582
Total sugars	3.80	68.6	1.20
NDF	138.6	206.6	151.9
ADF	50.8	119.1	84.2
ADL	17.3	29.9	20.0
Condensed tannins	1.80	nd	nd
Free gossypol	nd	1.03	nd
Metabolizable energy (MJ/kg) ¹	13.33	7.69	13.19

nd: not determined. ¹ME content was estimated using European energy calculation (Janssen, 1989). Sorghum (tannin < 4 g) $MEn = 31.02 \times CP + 77.03 \times EE + 37.67 \times NFE$; cottonseed meal expeller or solvent, $MEn = 21.36 \times DM + 47.13 \times EE - 30.55 \times CF$; millet (corn equation), $MEn = 36.21 \times CP + 85.44 \times EE + 37.26 \times NFE$; with DM: dry matter, EE: ether extract, CF: crude fiber and NFE (Nitrogen Free Extract) = $DM - (EE + CP + Ash + CF)$.

level of substitution existed on feed intake with sorghum-based diets whereas growth performance decreased with the increasing level of substitution of corn by sorghum.

The reduction of growth performance obtained in sorghum- and cottonseed meal-based diets is supposed to be related to their content of anti-nutritional factors. According to several authors, tannins and phytate in sorghum form complexes with protein and carbohydrates, particularly with starch thereby reducing nitrogen and starch digestibility (Selle *et al.*, 2010; Mahmood *et al.*, 2014). Birds fed high tannin diets suffered from a severe decrease of growth compared to low tannin or control fed birds (Flores *et al.*, 1994; Mahmood *et al.*, 2006). In cottonseed meal, free gossypol decreases lysine digestibility and inhibits the activity of pepsin and trypsin in gastro-intestinal tract, thus reducing growth in broilers (Nagalakshmi *et al.*, 2007). For more flexibility in the type of ingredients used in the least cost feed formulation, it could be hypothesized that simultaneous utilization of more than one of these alternative feed ingredients in poultry diets will become commonplace. Consequently, the question arises whether simultaneous inclusion of sorghum and cottonseed meal in broiler feeding would result in additive effect or a synergy of the antinutritional factors. Besides, the protein content of millet is higher than corn and the essential amino acid profile is more balanced in millet than in corn (Heuzé *et al.*, 2012). The high essential amino acid concentrations, the high digestibility of these amino acids (Yin *et al.*, 2002; Adeola and Orban, 1995) and the changes in the small intestine mucosa morphology were reported to be the factors leading to a better feed efficiency with millet (Baurhoo *et al.*, 2011; Goodarzi Boroojeni *et al.*, 2011). Knowing that, it might be supposed that bird's nutrient digestibility increases when millet is used in sorghum-based diets.

Therefore, this work was designed to evaluate the effects of partial or total substitution of corn with sorghum and millet, and partial replacement of soybean meal with cottonseed meal on performance and nutrient digestibility in broiler. A second aim of this study was to investigate the interactions that might be induced on broiler performance when sorghum and cottonseed meal are simultaneously included in the diet or when sorghum and millet totally replaced corn in the diet.

Materials and methods

General

Two trials were conducted: the first experiment combined sorghum and cottonseed meal and the second one used sorghum and millet. Nutritional composition of these feed ingredients

Table 2 Dietary composition and nutrient content of experimental diets given from 8 to 28 days in Exp. 1

	Control	Sorghum-based diets			Cottonseed meal-based diets		Sorghum and cottonseed meal-based diets		
	C1	S30	S45	S60	CM15	CM40	S30/CM40	S45/CM25	S60/CM15
Ingredient (g/kg as fed)									
Wheat	60.0	60.0	73.1	80.0	60.0	60.0	54.6	71.5	99.2
Corn	513.2	385.6	304.4	230.0	513.2	514.1	385.6	314.4	222.0
Sorghum	-	165.0	243.0	320.2	-	-	165.0	230.0	290.0
Soybean meal (48%)	365.1	346.0	340.0	332.0	307.0	207.9	206.0	241.0	275.0
Cottonseed meal					55.0	146.0	130.0	91.2	58.0
Soybean oil	25.0	7.0	2.0	-	27.0	30.0	15.0	10.0	15.0
Limestone	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3.2	4.0	4.0	4.0
Dicalcium Phosphate	23.0	23.0	23.0	23.0	22.1	23.5	24.5	24.0	24.1
Salt	3.0	2.5	3.0	2.9	3.0	2.1	2.3	2.5	2.5
Mineral Premix ¹	4.1	4.1	4.6	4.6	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
DL-Methionine	1.3	1.3	1.3	1.5	1.6	2.0	1.9	1.7	1.6
L-Lysine HCl	1.1	1.3	1.4	1.6	2.2	5.0	5.0	4.1	3.3
L-Threonine	0.2	0.2	0.2	0.2	0.8	2.1	2.0	1.5	1.2
Calculated composition (g/kg unless specified) ²									
Crude protein	215	216	217	218	216	218	218	218	219
Crude fat	51.8	34.7	29.6	27.5	54.4	58.4	44.0	38.4	42.2
Ca	9.4	9.3	9.4	9.4	9.1	9.0	9.5	9.4	9.5
Av. P	4.8	4.6	4.6	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.6
Dig Lys	11.3	11.1	11.1	11.1	11.0	11.1	11.0	11.1	11.2
Dig Meth + Cyst	7.5	7.4	7.4	7.5	7.4	6.9	6.8	6.9	7.1
Dig Thr	7.5	7.4	7.4	7.3	7.4	7.4	7.4	7.4	7.5
Dig Trp	2.2	2.2	2.2	2.2	1.9	1.5	1.6	1.8	2.0
Free gossypol (mg/kg)	-	-	-	-	5.0 ³	12.0 ³	13.0	9.0	6.0
ME (MJ/kg) ⁴	12.3	12.0	11.9	11.9	12.5	12.3	11.9	11.9	12.1
Analyzed composition (g/kg)									
Crude protein	231	224	222	227	226	217	219	215	215
Crude fat	53.4	42.3	39.0	36.6	61.6	66.6	50.0	45.9	52.0
Condensed tannins	0.47	0.60	0.63	0.77	0.66	0.81	0.89	0.78	0.68
NDF	120	118	116	120	130	131	119	126	136
ADF	33.7	37.4	39.5	41.0	39.6	49.0	44.6	46.4	48.6
ADL	5.5	6.3	7.5	7.9	8.0	5.4	1.9	2.7	13.9

C1: control diet; S: sorghum, CM: cottonseed meal. The number represents the level of substitution of corn for sorghum-based diets or soybean meal for cottonseed meal-based diets. ¹Premix composition (per kg): vitamin A, 1100000 UI; vitamin D3, 300000 UI; vitamin E, 4000 UI; vitamin B1, 250 mg; vitamin B2, 800 mg; vitamin B6, 500 mg; vitamin B12, 2.5 mg; vitamin PP, 5000 mg; vitamin C, 10000 mg; vitamin K3, 300 mg; Zn, 5400 mg; Cu, 3000 mg; Fe, 6000 mg; I, 124 mg; Se, 29.7 mg; Mn, 8000 mg; Ca, 0.17 mg; Co, 60; Mg, 0.008; folic acid, 150 mg; choline chloride, 50004 mg; biotin, 15. Premix also supplied titanium 1.0 g/kg of diet and Avatec, 0.6 g/kg of diet. ²Nutritional values were calculated, based on Sauvante *et al.* (2004). ³Analyzed composition. ⁴ME content estimated using European energy equation (Fisher and McNab, 1987)

are described Table 1. The same batch of sorghum (*Sorghum bicolor*) originating from France was used in the two experiments and had low condensed tannin content (1.80 g/kg). Millet (*Panicum miliaceum*) originated from France. Prepressed solvent extracted cottonseed meal (*Gossypium spp.*, bought in France) having 402 g/kg CP and 1.03 g/kg free gossypol contents was used in exp. 1. Birds were reared in wire-floored battery cages in an environmentally controlled house. The environmental temperature was maintained at 32°C during the 1st week and decreased to 23°C until the end of the experiment according to Ross guidelines (Aviagen, 2007). Experimental procedures and animal care were carried out according to French legislation at the time of the study (2013) and were approved by the local ethical committee.

Experiment 1: simultaneous use of sorghum and cottonseed meal (Exp. 1)

Seven hundred and twenty day-old male Ross PM3 broilers were fed *ad libitum* from 1 to 8 days of age with a starter diet containing 12.6 MJ/kg of ME and 225 g/kg of CP. On day 8, 486 birds were randomly selected and divided into nine groups. Each group contained 9 replicates of 6 birds. Birds were assigned to replicates on the basis of body weight (BW) such that as homogenous BW as possible were obtained between each treatment. The experimental period ran from 8 to 28-d. Birds were given *ad libitum* access to feed and water throughout the experiment.

Nine different treatments were offered in a pellet form (Table 2). The control treatment (C1) was based on corn and soybean meal as the main ingredients and contained 12.3 MJ/kg ME and 231 g/kg CP. The experiment was designed with dietary level of substitution and type of ingredient as the main effects. Three experimental diets were formulated by substituting 30, 45 or 60% of the corn by sorghum (S) and two other diets were similarly formulated by replacing 15 or 40% of the soybean meal with cottonseed meal (CM). To test the effect of a simultaneous inclusion of both S and CM in broiler feeding, three more diets combined the level of substitution of sorghum and cottonseed meal as follows: 30% S and 40% CM, 45% S and 25% CM; 60% S and 15% CM. Diets were formulated to meet Ross broiler nutrient specifications (Aviagen, 2007) and included 1 g/kg titanium dioxide (TiO₂) as digestibility marker. All diets were formulated to be isocaloric and isonitrogenous by adjusting soybean oil, wheat and amino acids supply to avoid any essential amino acids as limiting factor.

Table 3 Dietary composition and nutrient content of experimental diets given from 8 to 27 days in Exp. 2

	Control	Sorghum-based diets			Millet-based diets			Sorghum and millet-based diets		
	C2	S60	S80	S100	M60	M80	M100	S30/M30	S40/M40	S50/M50
Ingredient (g/kg as fed)										
Wheat	61.8	50.0	60.4	71.0	70.1	75.9	105.2	68.8	66.2	106.7
Corn	500.7	213.6	120.0	-	220.0	120.0	-	220.0	129.2	-
Sorghum	-	310.0	400.7	514.0	-	-	-	150.0	200.5	250.2
Soybean meal (48%)	375.0	357.9	354.4	349.5	334.0	318.0	300.0	347.7	338.3	325.9
Millet	-	-	-	-	310.7	420.1	528.2	150.0	200.5	250.2
Soybean oil	28.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	29.0	30.0	30.8
Limestone	3.7	3.3	3.1	3.5	3.7	5.2	5.4	3.9	4.0	4.2
Dicalcium Phosphate	21.3	22.7	22.9	23.2	22.2	20.8	20.5	21.7	22.0	22.0
Salt	3.3	2.7	2.5	2.5	3.0	2.9	2.8	2.8	2.9	2.8
Mineral Premix ¹	4.6	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
DL-Methionine	1.2	4.0	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3	1.2	1.2	1.3
L-Lysine HCl	0.4	0.7	0.8	1.0	1.1	1.6	2.1	0.8	1.1	1.6
L-Threonine		1.0				0.2	0.4			0.2
Calculated composition (g/kg unless specified) ²										
Crude protein	219	219	217	218	218	218	218	218	218	218
Crude fat	63.2	61.3	59.7	57.6	64.1	63.6	62.0	61.5	61.8	59.8
Ca	9.0	9.0	9.0	9.1	9.0	9.2	9.1	9.0	9.1	9.1
Av. P	4.5	4.5	4.5	4.50	4.70	4.5	4.5	4.50	4.50	4.5
Dig Lys	11.5	11.1	11.0	11.0	11.1	11.1	11.0	11.0	11.0	11.1
Dig Meth + Cyst	7.9	10.0	7.3	7.3	7.3	7.1	7.0	7.5	7.4	7.3
Dig Thr	7.9	8.5	7.5	7.4	7.4	7.4	7.4	7.5	7.4	7.4
Dig Trp	2.4	2.3	2.4	2.4	2.5	2.6	2.6	2.4	2.5	2.5
ME (MJ/kg) ³	12.5	12.6	12.5	12.6	12.8	12.8	12.8	13.0	12.5	12.8
Analyzed composition (g/kg)										
Crude protein	224	226	219	224	226	221	220	224	223	218
Crude fat	57.7	60.7	60.1	61.2	66.4	70.4	72.7	72.8	62.9	74.5
Condensed tannins	-	0.60	0.54	0.78	-	-	-	0.31	0.40	0.43
NDF	76.8	90.0	81.7	81.4	91.3	101.0	111.8	91.9	95.3	95.2
ADF	30.2	32.1	32.1	33.7	38.3	44.6	50.0	36.7	39.5	39.8
NDL	4.7	5.1	5.6	6.1	4.8	5.8	7.7	5.4	5.1	3.4

C2: control diet; S: sorghum, M: millet. The number represents the level of substitution of corn. ¹Premix composition (per kg): vitamin A, 1100000 UI; vitamin D3, 300000 UI; vitamin E, 4000 UI; vitamin B1, 250 mg; vitamin B2, 800 mg; vitamin B6, 500 mg; vitamin B12, 2.5 mg; vitamin PP, 5000 mg; vitamin C, 10000 mg; vitamin K3, 300 mg; Zn, 5400 mg; Cu, 3000 mg; Fe, 6000 mg; I, 124 mg; Se, 29.7 mg; Mn, 8000 mg; Ca, 0.17 mg; Co, 60; Mg, 0.008; folic acid, 150 mg; choline chloride, 50004 mg; biotin, 15. Premix also supplied titanium 1.0 g/kg of diet and Avatec, 0.6 g/kg of diet. ²Nutritional values were calculated, based on Sauvante *et al.* (2004). ³ME content estimated using European energy equation (Fisher and McNab, 1987)

Experiment 2: total corn substitution by millet and sorghum in broiler diets (Exp. 2)

Seven hundred and twenty day-old male Ross PM3 broilers were fed *ad libitum* with the same starter feed as in Exp. 1 from 1 to 8 days. On day 8, nine replicates (of six chicks per cage) of similar BW were constituted per treatment. The experimental period ran from 8 to 27-d of age. Birds were given one of the 10 treatments: a control complete feed C2 and nine experimental diets designed as a factorial (3×3) with dietary level of substitution and type of ingredient as the main effects (Table 3). All diets were given as pellets.

The aim of this experiment was to establish whether it would be possible to substitute corn with sorghum beyond the levels of substitution used in Exp. 1. Therefore, three experimental diets were formulated by replacing 60, 80 or 100% of the corn with sorghum (S60, S80, S100). Three millet-based diets (M60, M80, and M100) were formulated the same way. In order to assess the interactions that might exist when these ingredients are used simultaneously, three more diets were formulated by substituting different proportions of the corn with both S and M (S30/M30, S40/M40, S50/M50). Birds were given *ad libitum* access to feed and water throughout the experiment. All diets were formulated to be isocaloric (12.69 ± 0.05 MJ/kg) and isonitrogenous (222.5 ± 0.9 g/kg) and formulated to meet Ross broiler nutrient specifications (Aviagen, 2007) as in Exp.1. Titanium dioxide was included at 1 g/kg in all diets as digestibility marker.

Measurements

Performance (Exp. 1 & Exp.2). Chicken BW was measured at days 8, 15, 21 and 28 in Exp. 1. In Exp. 2, birds were weighed at days 8, 14 and 27 days of age. Feed intake was measured every week by weighing feed refusals in all experiments. Due to practical reasons, feed intake and body weight were not measured at day 20 in Exp. 2. Feed conversion ratio (FCR) was calculated as the ratio between total feed intake and body weight gain of all birds in each cage. Feed intake, body weight gain and feed conversion ratio were calculated after correcting for mortalities.

Apparent ileal digestibility (Exp.1 & Exp.2). At the end of each experimental period, all birds were slaughtered by cervical dislocation. The contents of the terminal part of the ileum, defined as the region between 17 cm and 2 cm proximal to the ileo-caecal junction were collected for ileal digestibility determinations. Digesta of birds were pooled per cage, freeze-dried and ground before analysis. All digesta samples were analyzed for dry matter (DM),

nitrogen and concentration of titanium dioxide as indigestible marker. The apparent ileal digestibility (AID) coefficient of nutrients in the two experiments was calculated according to the following equation:

$$AID (\%) = \left\{ 1 - \left(\frac{Ti_{Diet}}{Ti_{ileum}} \times \frac{Nutrient_{ileum}}{Nutrient_{Diet}} \right) \right\} \times 100$$

where Ti_{Diet} and Ti_{ileum} represent concentration of titanium in feed and ileal digesta respectively. $Nutrient_{Diet}$ and $Nutrient_{ileum}$ are the nutrients (protein and energy) in feed and ileal digesta.

Faecal digestibility (Exp.2). In the second experiment, plastic trays were placed under cages for total excreta collection. Representative samples of excreta were then collected on 6 cages per treatment over a period of 3×24 h from day 22 to 24. All excreta samples were freeze-dried and then ground to pass through 0.5 mm sieve. Samples of diets and excreta were analyzed for DM, GE, starch, fat and nitrogen compounds. Apparent metabolizable energy (AME) was calculated as the difference between energy intake and excretion, relative to feed intake. AME was then corrected for the energy of N retention (AMEn) according to Hill and Anderson (1958).

Chemical analysis

Chemical composition of feeds and faeces was determined following standard procedures (AOAC, 1995). Dry matter was determined with oven drying at 103°C . Crude fat contents were determined after a saponification with determination by gas chromatography (Büchi B820). Gross energy was determined using a bomb calorimeter (IKA, C2000 Basic). Total nitrogen analysis was carried out with a Leco N analyzer (LECO FP528) and crude protein was then calculated as $\text{N} \times 6.25$. Starch was measured using a polarimeter (Dellingham Stanley, ADP 410). Total sugars were determined according to Luff-Schoorl method. NDF, ADF and ADL in feed ingredients and diets were measured on Fibertech according to Van Soest and Wine (1967). Titanium concentrations were determined by Induction Coupled Plasma after $\text{HNO}_3/\text{NH}_4\text{F}$ mineralization in microwaves. Faecal protein nitrogen (Terpstra and de Hardt, 1974) and faecal starch were determined by NIRS according to Bastianelli *et al.* (2010). Condensed tannins were determined by vanillin assay and expressed as catechin equivalent. Gossypol contents were determined by colorimetry following the standard ISO6866.

Statistical analysis

Table 4 Effect of diets with sorghum (S), cottonseed meal (CM) or their combination (S/CM) on the performance of broilers fed from 8 to 28-d old (Exp. 1)

Age (days)	Feed intake (g/b per day)				Weight gain (g/b per day)				FCR			
	8-15d	15-21d	21-28d	8-28d	8-15d	15-21d	21-28d	8-28d	8-15d	15-21d	21-28d	8-28d
C1	64.1	115	151	111	50.3	80.8	89.2	74.2	1.27 ^a	1.43 ^a	1.70	1.50 ^{ac}
S30	67.0	121	156	115	49.8	82.7	90.0	74.1	1.35 ^{ab}	1.46 ^a	1.73	1.55 ^{ab}
S45	65.1	118	161	115	48.7	78.2	95.1	74.0	1.33 ^{ab}	1.50 ^a	1.70	1.55 ^a
S60	66.8	124	160	117	49.8	79.1	94.3	74.4	1.34 ^{ab}	1.57 ^b	1.69	1.57 ^a
CM15	65.0	113	148	109	50.2	81.1	90.0	73.8	1.29 ^{ab}	1.40 ^a	1.65	1.47 ^c
CM40	65.2	119	153	112	49.5	79.6	94.6	74.6	1.32 ^{ab}	1.49 ^{ab}	1.62	1.51 ^{ac}
S30/CM40	67.3	114	157	112	49.2	78.8	92.5	73.5	1.37 ^{ab}	1.44 ^a	1.72	1.53 ^a
S45/CM25	67.4	115	159	114	48.6	79.6	89.9	72.6	1.38 ^b	1.51 ^a	1.78	1.58 ^b
S60/CM15	65.9	118	154	113	50.1	80.2	92.7	74.3	1.31 ^{ab}	1.48 ^a	1.67	1.52 ^{ac}
SEM	1.3	3	4	2	0.7	2.1	2.7	1.2	0.02	0.03	0.03	0.01
Treatment effect ¹	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	**	ns	***
Type of ingredient ²	ns	ns	†	†	ns	ns	ns	ns	**	*	ns	***
Level of substitution ³												
Sorghum	ns	ns	ns	ns	ns	†	ns	ns	ns	*	ns	ns
Cottonseed meal	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	**	ns	ns
Sorghum and Cottonseed meal	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns

C1: control diet; S: sorghum, CM: cottonseed meal. The number represents the level of substitution of corn for sorghum-based diets or soybean meal for cottonseed meal-based diets. ¹Effect of treatments: ANOVA on 9 diets. ²Effect of the type of ingredient: ANOVA on 4 treatments (control vs. sorghum-based diets vs. cottonseed meal-based diets vs. sorghum/cottonseed meal-based diets). ³Effect of the level of substitution (dose-response effect) within each type of ingredient. *** P<0.001; ** P < 0.01; * P < 0.05; † P ≤ 0.10. ns: not significant at P > 0.10. a, b, c: values with the same superscript are not significantly different at P < 0.05.

Data analyses were performed using *R version 3.0.2* (R Core Team, 2013).

The mortality recorded for all treatments in each experiment was submitted to a 1-way ANOVA. In Exp. 1, data collected was analyzed based on 3 periods: (1) 8 to 15-d; (2) 15 to 21-d (3) 21 to 27-d. In Exp. 2, analyses were performed based on two periods: (1) 8 to 14-d and (2) 14 to 27-d. A 1-way ANOVA was performed in each period of age to test the treatment effect (9 levels in exp. 1; 10 levels in exp. 2) on feed intake, weight gain and FCR. Data were also submitted to a 1-way ANOVA to evaluate the effect of the type of ingredient irrespective of its level: C1 vs. S vs. CM vs. S/CM in exp. 1 and C2 vs. S vs. M vs. S/M in exp. 2. To assess the effect of the level of substitution, treatments of each ingredient were submitted to a Kruskal-Wallis test at each period of age. These analyses were also realized on the data collected for apparent ileal digestibility and faecal digestibility (FD).

Tested factors were considered significant if $P < 0.001$, $P < 0.01$ and $P < 0.05$, discussed as a trend if $P < 0.10$, and not significant if $P > 0.10$. A Bonferroni-Dunnet pairwise comparison was used to compare differences between mean after each ANOVA test being performed. A multiple comparisons post-hoc test (Siegel and Castellan, 1988) was realized to compare differences between means for the level of substitution effect in each ingredient-based diets.

Results

Experiment 1: simultaneous use of sorghum and cottonseed meal

Performance. The overall mortality from 8 to 28-d was $4.17 \pm 0.91\%$ and was not influenced by the treatments. Feed intake was not affected by treatments throughout the experimental period (Table 4). However, from 21 to 28-d and 8 to 28-d, it tended to be influenced by the type of ingredient with the lowest values in CM-based diets and the highest in S-based diets ($P = 0.07$). Feed intake of the control diet and S/CM-based diets were intermediate. There was no significant effect of the level of substitution of each ingredient on feed intake.

Weight gain was similar among treatments and was not affected by the inclusion of sorghum or cottonseed meal. A high weight gain value (82.7 g/b/d) was recorded for S30 diet at days 15-21. This induced a trend for a level effect in sorghum at this period.

CM-based diets resulted in a similar FCR to control diet (1.49 vs. 1.50). Higher FCR were obtained with sorghum- (1.55) and S/CM-based diets (1.54). The lowest FCR value was observed with CM15 (1.47) while the highest was obtained with S45/CM25 (1.58). However, only a few significant differences of FCR were obtained in the first two periods regarding the

Table 5 Apparent ileal digestibility of protein and energy of broilers fed sorghum- (S) and/or cottonseed meal- (CM) based diets measured at 28-d (Exp. 1)

	AID of protein (%)	AID of energy (%)
C1	82.93 ^a	78.11 ^a
S30	81.30 ^a	77.05 ^{ac}
S45	80.49 ^{ab}	76.21 ^{ac}
S60	80.27 ^{ab}	75.11 ^{bcd}
CM15	79.57 ^{ab}	75.70 ^{ab}
CM40	78.04 ^{bc}	72.67 ^{de}
S30/CM40	74.73 ^c	70.16 ^e
S45/CM25	78.00 ^b	73.28 ^{bd}
S60/CM15	77.42 ^{bc}	72.72 ^{de}
SEM	0.77	0.60
General treatment effect	***	***
C vs. S vs. CM vs. S/CM ¹	***	***
Level of substitution ²		
Sorghum	ns	†
Cottonseed meal	ns	***
Sorghum and Cottonseed meal	*	*

C1: control diet; S: sorghum, CM: cottonseed meal. The number represents the level of substitution of corn for sorghum-based diets or soybean meal for cottonseed meal-based diets. ¹Effect of treatments: ANOVA on 9 diets.

²Effect of the type of ingredient: ANOVA on 4 treatments (control vs. sorghum-based diets vs. cottonseed meal-based diets vs. sorghum/cottonseed meal-based diets). ²Effect of the level of substitution (dose-response effect) within each type of ingredient. *** P<0.001; ** P < 0.01; * P < 0.05; † P ≤ 0.10. ns: not significant at P > 0.10. a, b, c, d, e: values with the same superscript are not significantly different at P < 0.05.

dose-response effect of each ingredient. FCR increased with the level of substitution of S and CM. When the two ingredients were included in the same diet from 8 to 15-d, FCR was affected due to a low value in S60/CM15.

Apparent ileal digestibility of protein and energy. Table 5 shows the effect of treatments on AID of protein and energy. AID of protein of all experimental treatments was lower to control diet ($82.93 \pm 0.70\%$). This difference was not significant for diets based on sorghum ($80.69 \pm 0.34\%$), but it was significant for CM-based diets ($78.81 \pm 0.59\%$). AID of protein of S/CM-based diets was the lowest ($76.71 \pm 0.55\%$), with values significantly lower from control and S-based diets. No effect of the level of substitution was found on AID of protein in S- and CM-based diets. However, the combination of these two ingredients affected AID of protein in relation to the low value in S30/CM40.

AID of energy was different among treatments with the highest values in control ($78.11 \pm 0.66\%$) and the lowest in S/CM-based diets ($72.05 \pm 0.52\%$). AID of energy obtained with S-based diets ($76.12 \pm 0.31\%$) was not significantly different from the control whereas in CM-based diets ($74.19 \pm 0.51\%$) it was lower than the control. The level of substitution of sorghum tended to affect AID of energy ($P = 0.09$) while in CM-based diets, AID of energy decreased with the increasing level of substitution. Combination of sorghum and cottonseed meal affected AID of energy with the lowest values in S30/CM40 diet and the highest in S45/CM25 diet.

Experiment 2: total corn substitution by millet and sorghum in broiler diets

Performance. The overall mortality recorded in this experiment was $2.41 \pm 0.62\%$ and was not affected by the treatments. Simultaneous utilization of sorghum and millet resulted in similar feed intake and growth performance as the control diet (Table 6). As main effects, sorghum and millet did not have a significant impact on feed intake, weight gain and feed conversion ratio. No difference of level of substitution of the feed ingredient was observed for M-based diets and S/M-based diets. However, there was a significant difference between the three S-based diets from 8 to 14-d of age with no significant post hoc effect.

Apparent ileal digestibility of protein and energy. The effects of the cereal type on AID of protein and energy are shown in Table 7. AID of protein of all experimental treatments was higher than the control diet ($80.40 \pm 1.44\%$). This difference was not significant for S- ($82.17 \pm$

Table 6 Effect of diets with sorghum (S), millet (M) or their combination (S/M) on the performance of broilers fed from 8 to 27-d old (Exp. 2)

	Feed intake (g/b per day)			Weight gain (g/b per day)			FCR		
	8-14d	15-20d	8-27d	8-14d	15-27d	8-27d	8-14d	15-20d	8-27d
C2	62.7	134	109	47.3	84.6	71.6	1.33	1.58	1.52
S60	61.6	131	107	45.9	85.3	71.5	1.34	1.54	1.50
S80	61.9	132	108	45.8	85.8	71.8	1.35	1.54	1.50
S100	63.9	132	108	47.6	82.8	70.4	1.34	1.60	1.54
M60	63.6	130	107	46.4	85.9	72.1	1.37	1.51	1.48
M80	62.1	134	109	44.8	86.5	71.9	1.38	1.55	1.51
M100	62.4	132	108	46.4	85.0	71.5	1.35	1.55	1.51
S30/M30	59.8	128	104	45.3	81.7	68.9	1.32	1.56	1.51
S40/M40	63.1	132	108	45.0	84.6	71.2	1.42	1.55	1.52
S50/M50	63.3	133	109	48.2	84.2	71.6	1.34	1.58	1.52
SEM	1.5	2.0	1.5	1.3	1.6	1.2	0.02	0.02	0.02
<i>Treatment effect</i> ¹	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
<i>Type of ingredient</i> ²	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
Level of substitution ³									
<i>Sorghum</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	*	<i>ns</i>	<i>ns</i>
<i>Millet</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
<i>Sorghum and millet</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>

C2: control diet; S: sorghum, M: millet. The number represents the level of substitution of corn. ¹Effect of treatments: ANOVA on 10 diets. ²Effect of the type of ingredient: ANOVA on 4 treatments (control vs. sorghum-based diets vs. millet-based diets vs. sorghum/millet-based diets). ³Effect of the level of substitution (dose-response effect) within each type of ingredient. *** P < 0.001; ** P < 0.01; * P < 0.05; † P ≤ 0.10. ns: not significant at P > 0.10.

0.44%) and S/M-based diets ($82.15 \pm 0.60\%$). However, it was significant for millet-based diets ($83.73 \pm 0.23\%$). AID of protein was affected with the increasing level of millet when it was used separately or combined with sorghum. However, no significant difference was found between these diets with the post-hoc test. No dose-response effect of sorghum was found on AID of protein.

Similar results were obtained for the AID of energy with the highest values in M-, followed by S/M-, S-based and control diets in descending order. The level of substitution tended to affect AID of energy in S-based diets ($P = 0.09$) while it significantly affected AID of energy in M-based diets and S/M-based diets.

Faecal digestibility of DM, protein, fat and starch and AMEn values. FD of nutrients is shown in Table 8. There were significant differences in DM digestibility, although none of the experimental treatments was significantly different from the control diet ($68.81 \pm 0.46\%$). Lower DM digestibility was observed with S-based diets ($67.52 \pm 0.17\%$) compared to M-based diets ($69.15 \pm 0.30\%$). S/M-based diets were intermediate ($68.57 \pm 0.25\%$). In S and S/M, there was a significant reduction of DM digestibility when the level of substitution increased.

FD of protein was higher in the control diet ($81.50 \pm 0.85\%$) compared to all other treatments. M- ($77.09 \pm 0.62\%$) and S/M-based diets ($77.89 \pm 0.54\%$) were significantly lower than the control diet whereas S-based diets ($79.35 \pm 0.32\%$) were not significantly different. FD of protein in S- and M-based diets tended to decrease linearly with the increasing level of substitution of corn. However, there was no effect of the level of substitution on FD of protein when both sorghum and millet are simultaneously used in the diet.

No significant differences were observed between the control diet ($82.23 \pm 1.64\%$) and the experimental treatments. However, S-based diets ($79.82 \pm 0.46\%$) showed lower FD of fat compared to M- ($83.30 \pm 0.42\%$) and S/M-based diets ($83.83 \pm 0.62\%$). The level of substitution of sorghum or millet did not impact FD of fat. However, the combination of these two ingredients in broiler diet significantly affected fat digestibility with the highest level in the S30/M30 diet and the lowest level with the S50/M50 diet.

Higher FD of starch was obtained with the control diet ($97.21 \pm 0.17\%$) and M-based diets ($97.17 \pm 0.14\%$) compared to the S-based diets ($95.66 \pm 0.22\%$). FD of starch in S/M-based diets was intermediate ($96.28 \pm 0.16\%$) and not different from the control diet. The level of substitution of millet tended to affect FD of starch whereas a significant reduction was observed when the level of substitution increased in S and S/M-based diets.

Table 7 Apparent ileal digestibility of protein and energy of broilers fed sorghum- (S) and/or millet- (M) based diets measured at 27-d (Exp. 2)

	AID of protein (%)	AID of energy (%)
C2	80.40 ^{ac}	74.57 ^a
S60	82.85 ^{abc}	75.86 ^{ab}
S80	81.29 ^{abc}	74.63 ^a
S100	82.36 ^{abc}	76.32 ^{ab}
M60	84.33 ^b	78.40 ^b
M80	84.18 ^b	77.86 ^b
M100	82.62 ^{abc}	75.89 ^{ab}
S30/M30	83.20 ^{abc}	76.97 ^{ab}
S40/M40	83.86 ^{ab}	77.71 ^b
S50/M50	79.50 ^c	74.57 ^a
SEM	0.69	0.54
<i>Treatment effect</i> ¹	***	***
<i>Type of ingredient</i> ²	**	**
Level of substitution ³		
<i>Sorghum</i>	<i>ns</i>	<i>†</i>
<i>Millet</i>	**	**
<i>Sorghum and Millet</i>	**	*

C2: control diet; S: sorghum, M: millet. The number represents the level of substitution of corn. ¹Effect of treatments: ANOVA on 10 diets. ²Effect of the type of ingredient: ANOVA on 4 treatments (control vs. sorghum-based diets vs. millet-based diets vs. sorghum/millet-based diets). ³Effect of the level of substitution (dose-response effect) within each type of ingredient. *** P<0.001; ** P < 0.01; * P < 0.05; † P ≤ 0.10. ns: not significant at P > 0.10. a,b, c: values with the same superscript are not significantly different at P < 0.05.

The treatment significantly affected AMEn with the highest values obtained with M-based diets (13.38 ± 0.05 MJ/kg DM). Results observed with the control diet (13.26 ± 0.07 MJ/kg DM) were similar to S- (13.11 ± 0.03 MJ/kg DM) and S/M-based diets (13.29 ± 0.05 MJ/kg DM). AMEn tended to decrease ($P = 0.06$) with the level of substitution in sorghum-based diets. No dose-response effect was found in millet or when this latter was mixed with sorghum.

Discussion

Partial or total substitution of corn by sorghum and millet, and soybean meal replacement by cottonseed meal had no significant effect on broiler's feed intake and growth performance accordingly with Jacob *et al.* (1996a,b), Hidalgo *et al.* (2004) and Azman and Yilmaz (2005). These findings also confirm our meta-analytic results of a non-significant difference of feed intake between sorghum- or millet-based diets and corn-based diets, and between cottonseed meal and control diets (Batonon *et al.*, under review). However, sorghum-based diets increased FCR in Exp. 1 while no difference was found between the control and sorghum-based diets in Exp. 2. In both experiments, there were differences between formulated and calculated ME and CP contents in all treatments (Tables 2 and 3). This is because estimated ME and CP contents of major feed ingredients were used in formulating diets and these differ from determined CP contents and recalculated ME contents based on the laboratory determination of starch, sugar and fat. The trend of higher feed consumption in sorghum-based diets in exp. 1 could then be related to their lower recalculated ME content (11.9 MJ/kg) compared to the control diet (12.3 MJ/kg). In addition, sorghum-based diets were lower in analyzed fat content (39.3 ± 1.65 g/kg) than the control diet (53.4 g/kg) in Exp. 1. Since birds tend to decrease their consumption with the level of energy in the diet (Pérez-Bonilla *et al.*, 2012) it is possible that ME and fat contents contribute to explain the increased FCR observed in sorghum-based diets in Exp. 1 instead of the sorghum effect *per se*. Additionally, there was no difference in lysine intake and Meth+Cyst intake. Therefore, no deficiency in these amino acids seems to exist with young birds.

Another aim of this study was to evaluate the effects of simultaneous inclusion of sorghum and cottonseed meal or millet on broiler performance and nutrient digestibility. Most substitution studies involved only one ingredient and interactions are therefore not studied (Hidalgo *et al.*, 2004; Azman and Yilmaz, 2005). The present results showed that a combination of cottonseed meal and sorghum in the same diet did not decrease bird

Table 8 Faecal nutrient digestibility and Nitrogen-corrected apparent metabolizable energy (AMEn; MJ/kg DM) of sorghum- and/or millet-based diets of broilers measured on faeces collected from 22 to 24-d (Exp. 2)

	Nutrient digestibility (%)				AMEn (MJ/kg DM)
	Dry matter	Protein	Fat	Starch	
C2	68.81 ^{abc}	81.49 ^a	82.23 ^{abc}	97.21 ^{ab}	13.26 ^{ab}
S60	68.15 ^{abc}	80.47 ^{ab}	79.23 ^a	96.36 ^{abc}	13.22 ^{ab}
S80	67.46 ^{bc}	78.93 ^{ab}	80.05 ^{ab}	95.70 ^{cd}	13.11 ^{ab}
S100	66.95 ^c	78.67 ^{abc}	80.19 ^{ab}	94.92 ^d	13.01 ^b
M60	69.30 ^{ab}	78.75 ^{ab}	82.73 ^{abc}	97.59 ^a	13.44 ^a
M80	69.31 ^{ab}	77.58 ^{abc}	83.22 ^{abc}	96.92 ^{ae}	13.41 ^a
M100	68.83 ^{abc}	74.96 ^c	83.96 ^{bc}	96.99 ^{abe}	13.29 ^{ab}
S30/M30	69.46 ^a	79.41 ^{ab}	86.08 ^c	96.85 ^{ae}	13.44 ^a
S40/M40	68.42 ^{abc}	77.30 ^{bc}	82.05 ^{abc}	96.12 ^{bce}	13.27 ^{ab}
S50/M50	67.84 ^{abc}	76.98 ^{bc}	83.36 ^{abc}	95.85 ^{de}	13.17 ^{ab}
SEM	0.38	0.75	0.87	0.24	0.07
Treatment effect ¹	***	***	***	***	***
Type of ingredient ²	***	***	***	***	**
Level of substitution ³					
Sorghum	*	†	ns	*	†
Millet	ns	†	ns	†	ns
Sorghum and Millet	*	ns	**	*	ns

C2: control diet; S: sorghum, M: millet. The number represents the level of substitution of corn. ¹Effect of treatments: ANOVA on 10 diets. ²Effect of the type of ingredient: ANOVA on 4 treatments (control vs. sorghum-based diets vs. millet-based diets vs. sorghum/millet-based diets). ³Effect of the level of substitution (dose-response effect) within each type of ingredient. *** P<0.001; ** P < 0.01; * P < 0.05; † P ≤ 0.10. ns: not significant at P > 0.10. a, b, c, d, e: values with the same superscript are not significantly different at P < 0.05.

performance. Simultaneous replacement of corn by sorghum and millet also resulted in equivalent performance as the control diet. However, significant differences were observed in AID of protein and energy between feed ingredients, with the cottonseed meal- and sorghum/cottonseed meal-based diets having lower protein and energy digestibility than corn-based diets (Exp. 1). These results are consistent with those reported by Li *et al.* (2012) and Gonzalez-Vega and Stein (2012) who observed a decline in nitrogen and energy digestibility of growing and finishing pigs fed with various sources of cottonseed meal. Free gossypol in cottonseed meal is known to have an inhibitory action on certain enzymes in bird gastrointestinal tract like pepsinogen, pepsin and trypsin by binding with their free epsilon amino groups of lysine, thus reducing protein digestibility (Sharma *et al.*, 1978). However, in this study free gossypol levels were too low (5-13 ppm) to induce any detrimental effect on growth performance (Nagalakshmi *et al.*, 2007); but the effect of free gossypol could not be excluded from the reduction of digestibility with cottonseed meal-based diets. Similarly, lower faecal digestibility of fat and starch and lower AMEn values were obtained with sorghum-based diets consistently with previous reports (Selle *et al.*, 2010; Mahmood *et al.*, 2014) where digestibility coefficients were found inferior in sorghum than in other cereals due to the presence of phytate and phenolic compounds. Despite the lower fat and starch digestibility, our results suggest that birds fed low tannin sorghum-based diets were able to demonstrate equivalent performance as the control group since protein was equivalently available for both groups. Birds in millet-based diets have the same ability as those in corn-based diets to metabolize the energy and have a good feed efficiency. Higher coefficients of digestibility were obtained in millet-based diets consistently with Yin *et al.* (2002) and Baurhoo *et al.* (2011) and might be the factors leading to equivalent performance to the control diets.

The results obtained in the two experiments also suggest that the level of substitution of the experimental feed ingredients does not affect broiler performance, thus confirming the meta-analytic findings (Batonon *et al.*, under review). Corn can be partially replaced by sorghum (Exp. 1) or totally substituted by sorghum or millet without any damages on bird performance consistently with several authors (Davis *et al.*, 2003; Manwar and Mandal, 2009). Likewise, soybean meal substitution at various levels by cottonseed meal did not impact bird's response. However, the present study demonstrated that nutrient digestion can be compromised with these feed ingredients. The inclusion of exogenous enzymes in poultry diets is an established practice to improve performance and proteases are of particular

relevance since they can be used to reduce the levels of trypsin inhibitors and lectins, thus improving protein digestibility (Bedford and Partridge, 2010). Other feed processing technologies like hydrothermal processes combined with reducing agents may enhance the solubility and digestibility of sorghum protein by either cleaving disulphide linkages or preventing their formation (Liu *et al.*, 2013). Consequently, further investigations are required on the best strategies to enhance the nutritional value of these feed ingredients and lead to an increasing utilization in poultry.

Acknowledgements

The authors are grateful to the poultry research team of the Research Center for Animal Nutrition and Health (CRNA), DSM Nutritional Products-France for their technical assistance as well as their full commitment in the data collection. We also thank CIRAD SELMET laboratory staff, Laurent Bonnal and Elodie Baby for the chemical analyses.

References

- Adeola O and Orban JI 1995. Chemical composition and nutrient digestibility of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) fed to growing pigs. *Journal of Cereal Science*, 22, 177-184.
- AOAC International 1995. *Official Methods of Analysis*. 2 vols. 16th ed., Association of analytical communities, Arlington, VA, USA.
- Aviagen 2007. Poulet de chair Ross 308: specifications nutritionnelles. Aviagen, Scotland, UK.
- Azman MA and Yilmaz M 2005. The growth performance of broiler chicks fed with diets containing cottonseed meal supplemented with lysine. *Revue de Médecine Vétérinaire* 156, 104-106.
- Bastianelli D, Bonnal L, Juin H, Mignon-Grasteau S, Davrieux F and Carré B 2010. Prediction of the chemical composition of poultry excreta by near infrared spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 18, 69-77.
- Batonon DI, Umar Faruk M, Lescoat P, Weber GM and Bastianelli D. Responses of broiler chickens to dietary inclusion of sorghum, millet and cottonseed meal: a meta-analytical approach. *Animal*, under review.
- Baurhoo N, Baurhoo B, Mustafa AF and Zhao X 2011. Comparison of corn-based and Canadian pearl millet-based diets on performance, digestibility, villus morphology, and digestive microbial populations in broiler chickens. *Poultry Science* 90, 579-586.
- Bedford MR and Partridge GG 2010. *Enzymes in farm animal nutrition*. CAB International, London, UK.
- Davis AJ, Dale NM and Ferreira FJ 2003. Pearl millet as an alternative feed ingredient in broiler diets. *Journal of Applied Poultry Research* 12, 137-144.

- Fisher C and McNab JM 1987. Techniques for determining the ME content of poultry feeds. In: (eds W Haresign and DJA Cole). Recent Advances in Animal Nutrition, pp. 3-17. Butterworths, London.
- Flores MP, Castañón JIR and McNab JM 1994. Effect of tannins on starch digestibility and TME of triticale and semi purified starches from triticale and field beans. *British Poultry Science* 35, 281–286.
- Gonzalez-Vega JC and Stein HH 2012. Amino acid digestibility in canola-, cottonseed- and sunflower-products fed to finishing pigs. *Journal of Animal Science* 90, 4391-4400.
- Goodarzi Boroojeni F, Samie AH, Edriss MA, Khorvash M, Sadeghi G, Van Kessel A and Zentek J 2011. Replacement of corn in the diet of broiler chickens using foxtail millet produced by 2 different cultivation strategies. *Poultry Science* 90, 2817-2827.
- Heuzé V and Tran G 2012. Pearl millet (*Pennisetum glaucum*) grain. Feedipedia.org. A programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO. Retrieved on 8th august 2014 from <http://www.feedipedia.org/node/724>.
- Hidalgo MA, Davis AJ, Dale NM and Dozier III WA 2004. Use of whole pearl millet in broiler diets. *Journal of Applied Poultry Research* 13, 229-234.
- Hill FW and Anderson DL 1958. Comparison of metabolizable energy and productive energy determinations with growing chicks. *Journal of Nutrition*, 64: 587-603.
- Jacob JP, Mitaru BN, Mbugua PN, Blair R 1996. The effect of substituting Kenyan Serena sorghum for maize in broiler starter diets with different dietary crude protein and methionine levels. *Animal Feed Science Technology* 61, 27-39.
- Jacobs C and Parsons CM 2013. The effects of coarse ground corn, whole sorghum, and a prebiotic on growth performance, nutrient digestibility, and cecal microbial populations in broilers fed diets with and without corn distillers dried grains with solubles. *Poultry Science* 92, 2347-2357.
- Janssen WMMA 1989. European table of energy values for poultry feedstuffs. 3rd ed., Spelderholt center for poultry research and information services, Beekbergen, Netherlands.
- Li JT, Li DF, Zang JJ, Yang WJ, Zhang WJ and Zhang LY 2012. Evaluation of energy digestibility and prediction of digestible and metabolizable energy from chemical composition of different cottonseed meal sources fed to growing pigs. *Asian-Australian Journal of Animal Science* 25, 1430-1438.
- Liu SY, Selle PH and Cowieson AJ 2013. Strategies to enhance the performance of pigs and poultry on sorghum-based diets. *Animal Feed Science and Technology* 181, 1-14.
- Mahmood S, Khan MA, Sarwar M and Nisa M 2006. Chemical treatments to reduce antinutritional factors in salseed (*Shorea robusta*) meal: Effect on nutrient digestibility in colostomized hens and intact broilers. *Poultry Science* 85, 2207–2215.
- Mahmood S, Ali H, Ahmad F and Iqbal Z 2014. Estimation of tannins in different sorghum varieties and their effects on nutrient digestibility and absorption of some minerals in caged white leghorn layers. *International Journal of Agriculture and Biology* 16, 217-221.

- Manwar SJ and Mandal AB 2009. Effect of high moisture storage of pearl millet (*Pennisetum typhoides*) with or without feed enzymes on growth and nutrient utilization in broiler chickens. *Animal Science Journal* 80, 438-445.
- Nagalakshmi D, Rama Rao SV, Panda AK and Sastry VRB 2007. Cottonseed meal in poultry diets: a review. *The Journal of Poultry Science* 44, 119-134.
- Pérez-Bonilla A, Novoa S, García J, Mohiti-Asli M, Frikha M and Mateos GG 2012. Effects of energy concentration of the diet on productive performance and egg quality of brown egg-laying hens differing in initial body weight. *Poultry Science* 91, 3156-3166.
- R Core Team. 2013. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Sauvant D, Perez JM and Tran G 2004. Tables of composition and nutritional value of feed materials, INRA Editions and AFZ. Wageningen Academic Publishers, Paris, France.
- Selle PH, Cadogan DJ, Li X and Bryden WL 2010. Implications of sorghum in broiler chicken nutrition. *Animal Feed Science and Technology* 156, 57-74.
- Sharma NK, Lodhi GN and Ichhponani JS 1978. Comparative feeding value of expeller processed undecorticated and decorticated cottonseed cakes for growing chicks. *Journal of Agricultural Science* 91, 531-541.
- Siegel S and Castellan NJ 1988. Non parametric statistics for the behavioral sciences. MacGraw Hill Int., New York.
- Terpstra K and de Hart N 1974. The estimation of urinary nitrogen and faecal nitrogen in poultry excreta. *Z. Tierphysiol. Tierernihrng u. Futtermittelkde* 32, 306-320.
- Van Soest PJ and Wine RH 1967. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. IV. Determination of plant cell walls constituents. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists* 50, 50-55.
- Yin YL, Gurung NK, Jeaurond EA, Sharpe PH and de Lange CFM 2002. Digestible energy and amino acid contents in Canadian varieties of sorghum, pearl millet, high-oil corn, high-oil-high-protein corn and regular corn samples for growing pigs. *Canadian Journal of Animal Science* 82, 385-391.

Chapitre 3 : Systèmes d'alimentation innovants chez la poule pondeuse : quelles applications en milieu chaud ?

Publication n°4 : Batonon DI, Sakomura NK, Palma H, Bernadino de Lima M, Méda B and Lescoat P. Sequential and loose-mix feeding of whole and ground corn with a balancer diet affect laying hens performance under hot climate. *British Poultry Science*, *Soumis*

Publication n°5 : Batonon DI, Traineau M, Bouvarel M, Roffidal L, Lescoat P. 2014. Capacity of laying hens in sequential feeding to adjust their feed consumption when offered previously a nutritionally unbalanced diet. *European Poultry Science*, *78.2014*, *10.1399/eps.2014.37*

Au nombre des solutions nutritionnelles mises en évidence dans la littérature pour favoriser le développement des filières avicoles tropicales, on peut citer le mode de distribution de l'aliment. En complément des travaux réalisés sur les matières premières alternatives, il semblait pertinent de voir si des systèmes d'alimentation diversifiés ne permettraient pas de renforcer le développement des filières avicoles en régions chaudes. La poule pondeuse a été choisie comme modèle d'étude en lien avec les avantages mis en évidence lors de précédents travaux sur l'application des systèmes d'alimentation séquentielle et mélangée.

Ce chapitre présente deux articles consacrés à l'évaluation des systèmes d'alimentation séquentielle et mélangée en milieu chaud. La première étude est intitulée : « *Sequential and loose-mix feeding of whole and ground corn with a balancer diet affect laying hens performance under hot climate* ». Elle porte sur l'évaluation des performances de poules pondeuses recevant de façon séquentielle ou mélangée du maïs entier ou broyé avec un aliment protéique-minéral en conditions climatiques changeantes.

A l'issue de cette étude, les résultats obtenus ont souligné la nécessité d'une étude complémentaire sur l'alimentation séquentielle en condition chaude contrôlée. Cette étude a été réalisée en station expérimentale en France chez la poule pondeuse et a fait l'objet d'un article intitulé : « *Capacity of laying hens in sequential feeding to adjust their feed consumption when offered previously a nutritionally unbalanced diet* ».

Publication 4 :

Une expérimentation⁵ a été réalisée en milieu chaud et humide, au Brésil dans le but de : (i) déterminer les performances des poules pondeuses recevant du maïs entier ou grossièrement broyé en alimentation séquentielle et mélangée et (ii) évaluer l'effet des heures de distribution des différentes fractions (maïs et aliment protéique) sur la consommation et les performances des poules en alimentation séquentielle. Les poules ont été placées dans des cages collectives dans un bâtiment ouvert, tributaire des conditions météorologiques extérieures. Les conditions environnementales dans la zone d'étude sont caractérisées par de fortes amplitudes de température (entre 6 °C et 38 °C) et d'humidité relative (entre 25 % et 90 %).

Sept régimes expérimentaux ont été testés. Un aliment témoin à base de maïs et tourteau de soja distribué en continu sur la journée. Deux régimes ont été apportés sous forme mélangée avec du maïs entier ou du maïs broyé et un aliment protéique-minéral. L'aliment témoin et les aliments mélangés ont été offerts en une seule distribution à 9h. Deux lots en alimentation séquentielle ont reçu le maïs sous forme entière ou broyée à 9h et l'aliment complémentaire à 15h. Les deux autres groupes ont reçu le maïs à 19h et le complémentaire à 9h.

Les résultats ont montré un effet des systèmes d'alimentation sur le poids vif avec des valeurs les plus faibles enregistrées pour le séquentiel. Les poules ayant consommé du maïs entier de façon séquentielle ou mélangée ont également un poids plus élevé que celles ayant eu du maïs grossièrement broyé. Cette même hiérarchie a été observée au niveau de la production d'œufs et du poids des œufs. La consommation alimentaire a quant à elle varié en fonction de l'âge en interaction avec les conditions environnementales. Les poules en alimentation séquentielle ont une consommation d'aliment plus faible que celles en alimentation mélangée ; mais, aucun effet de la forme du maïs n'a été mis en évidence sur cette variable.

Cette étude a permis de montrer qu'il est difficile de mettre en évidence l'effet bénéfique de l'alimentation séquentielle sur l'efficacité alimentaire lorsque les poules sont soumises à des conditions environnementales élevées et variables d'un jour à un autre. Une question très importante qui ressort de cette étude est de savoir si ces performances sont uniquement dues au système d'alimentation ou à une interaction entre système d'alimentation et conditions environnementales. Il sera donc nécessaire d'évaluer l'efficacité de ces systèmes d'alimentation innovants dans des conditions environnementales contrôlées.

⁵ Ce chapitre a fait l'objet d'un article soumis dans la revue *British Poultry Science*.

Sequential and loose-mix feeding of whole and ground corn with a balancer diet affect laying hens performance under hot climate

Dolores I. Batonon^{1,2}, Nilva K. Sakomura³, Hilda Palma³, Michele Bernardino de Lima³, Bertrand Méda¹, Philippe Lescoat⁴

¹INRA, UR83 Recherches Avicoles, F-37380 Nouzilly, France

²UAC-FSA, Laboratoire de Recherches Avicoles et de Zoo-Economie, Abomey-Calavi, Bénin

³Departamento de Zootecnia, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, Jaboticabal, SP, Brasil

⁴AgroParisTech, UMR 1048 SADAPT, F-75005 Paris, France

Running Title: Corn particle size and feeding systems

Correspondence to: D. I. Batonon. E-mail: dolores.batonon@gmail.com

Full research paper

Abstract: 1. This experiment was designed i) to evaluate the performance of laying hens offered corn in sequential or loose-mix feeding systems; ii) to determine the effect of whole or coarse ground corn in sequential and loose-mix feeding and iii) to investigate the effect of the hour of distribution of corn (09h00 vs. 19h00) in sequential feeding. The trial ran from 19 to 29 weeks-of-age and was carried out in tropical conditions. A complete diet was fed as control. Two loose-mix and four sequential feeding diets were provided. Control and loose-mix diets were hand-fed at 09h00. Two sequential groups (SWC1 and SGC1) received corn at 09h00 and the balancer at 15h00 whereas for SWC2 and SGC2, corn was offered at 19h00 and the balancer at 09h00. WC stands for whole corn while GC stands for ground corn.

2. Sequential and loose-mix feeding systems have negative impacts on laying performance compared to control diet. A significant reduction of feed intake was observed with sequential diets compared to loose-mix and control.

3. In sequential, balancer diet intakes were higher with whole corn compared to ground corn. No effect of the hour of distribution was observed on corn intake but it affected the balancer one with lower consumption from 09h00 to 19h00.

4. Sequentially fed hens had lower egg mass and body weight than the loose mix or control fed birds. Feeding behaviour showed higher percentages of hens eating at the time of diet supplies compared to the period out of feed distribution.

5. The beneficial effect of sequential feeding was not obtained when birds were submitted to high and variable environmental temperatures and relative humidity within and between days. It is required to investigate better ways to reduce heat stress and enhance bird plasticity in these innovative feeding systems.

INTRODUCTION

Innovative feeding techniques such as sequential, loose-mix and choice feeding systems have been investigated in poultry nutrition under contrasted temperatures by several authors as a way to improve birds capability to cope with high temperature (Yo *et al.*, 1997; Umar Faruk *et al.*, 2010a; Batonon, Traineau *et al.*, 2014). They consisted in a distribution of two nutritionally contrasted fractions (energy or whole cereals vs. protein-mineral concentrate) either alternately (sequential feeding), mixed together in a single feeder (loose-mix) or offered simultaneously in different feeders (choice feeding).

Feeding whole grains and a protein-mineral concentrate in sequence had been shown to improve feed conversion in laying hens. Birds in sequential feeding under normal (Traineau *et al.*, 2013) or high temperatures (Umar Faruk *et al.*, 2010a) showed lower feed intake with a similar egg production compared to a complete diet fed birds whereas, loose-mix feeding led to similar performance as the conventional feeding system (Umar Faruk *et al.*, 2010a,b). Studies on choice feeding resulted in conflicting results: improved feed conversion ratio or lower growth performance than controls (Sinurat and Balnave, 1986; Olver and Malan, 2000). Particle size of feed ingredients and large particle digestion mechanisms seemed involved in the observed feed conversion efficiency (Nir *et al.*, 1990; Gabriel *et al.*, 2003). However, most of previous researches on whole grain in sequential and loose-mix feeding included diets based on wheat, sorghum, and millet while corn is the major cereal grain used in poultry industry and is available in tropical countries. Only one study to the authors' knowledge demonstrated that ground corn could be substituted to whole wheat in sequential feeding but with attenuated performance (Traineau *et al.*, 2013) while another one reported that choice feeding of whole corn resulted in similar feed intake and heavier egg weight than complete diet (Olver and Jonker, 1997). Thus, feeding laying hens with whole corn sequentially or loosely mixed with a balancer diet under high environmental temperatures can be studied.

In addition, cereal intake was always lower than the protein-mineral fraction in sequential feeding. Hens in sequential feeding also consumed less cereal than those in loose-mix (Umar Faruk *et al.*, 2010a, b, c). This lower level of intake was assumed to be partially

connected to the higher energy content of the cereal fraction, since birds used to decrease its consumption with the dietary energy level (Pérez-Bonilla *et al.*, 2012). Moreover, in a neutral environmental condition, unexpected heat changes on a short period affected performance of laying hens fed sequentially, thus leading to an assumption of a poor adaptability of the technique under hot climate (Traineau *et al.*, 2013). In high temperature, a lower cereal fraction intake was previously observed for sequentially fed birds compared to the control diet, knowing that this latter was already less consumed than the control in neutral temperature (Batonon, Traineau *et al.*, 2014). According to Mardsen and Morris (1987), ME intake is a curvilinear function of temperature with feed intake declining more steeply as ambient temperature approaches body temperature. Energy intake might be a factor limiting egg production in high environmental condition. Consequently, supplying adequate nutrients depending on the temperatures could be a better way to overcome the negative effect of heat stress under hot climate (Samara *et al.*, 1996; Balnave and Brake, 2005). Evaluating in tropical climate the effect of hour of distribution of the cereal on performance of birds fed sequentially is therefore of interest.

A limited number of studies have been published concerning the shape of cereal in sequential and loose-mix. Umar Faruk *et al.* (2011) concluded that whole wheat was more efficient than ground wheat in terms of egg weight and body weight while Traineau *et al.* (2013) showed no difference in cereal consumption between ground corn and whole wheat sequential diets. Since retention time of fine particles in the gizzard is lower than large particle (Vergara *et al.*, 1989), coarse grinding of corn may increase the cereal consumption in sequential feeding compared to whole corn supply.

This experiment was designed i) to evaluate the performance of laying hens offered corn and a balancer fraction in sequential or in loose-mix feeding systems. They were compared to a conventional feeding system using a single complete diet; ii) to determine the effect of corn physical form (whole vs. coarse ground) in sequential and loose-mix feeding and iii) to investigate the effect of the hour of distribution of corn (09h00 vs. 19h00) in sequential feeding. This experiment was carried out in tropical conditions with large variations of environmental temperature and relative humidity within and between days.

MATERIALS AND METHODS

This experiment was conducted at the 'Departamento de Zootecnia, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, Jaboticabal-São Paulo, Brazil. The Animal Care Committee of this faculty approved the protocol.

Table 1. Dietary composition, nutrient content (as-fed) and particle size of the experimental diets given from 19 to 29 weeks of age

	Fractions			Control diet	Loose-mix diets		Sequential diets			
	Balancer diet	Ground corn	Whole corn	C	LMGC	LMWC	SGC1	SGC2	SWC1	SWC2
Feed ingredient (g/kg) ¹										
Corn	350.5	1000	1000	610.6		610.3			610.3	
Soybean meal (45%)	435.2			261.3		261.1			261.1	
Limestone	166.5			99.7		99.9			99.9	
Dicalcium phosphate	18.3			10.9		11.0			11.0	
Soybean oil	11.4			6.7		6.9			6.9	
Salt	9.3			5.1		5.6			5.6	
Mineral Premix ²	1.5			1.5		0.9			0.9	
DL-Methionine	3.9			2.3		2.3			2.3	
L-Threonine	1.6			1.0		1.0			1.0	
L-Tryptophan	0.4			0.2		0.2			0.2	
Valine	1.3			0.8		0.8			0.8	
Calculated composition (g/kg) ³										
Metabolizable energy (MJ/kg)	9.6	14.9	14.9	11.7		11.7			11.7	
Crude protein	229	81.0	81.0	170		170			170	
Calcium	70.0	0.30	0.30	42.0		42.0			42.0	
Av. P	4.50	0.80	0.80	3.00		3.00			3.00	
Dig Lys	11.3	1.80	1.80	7.50		7.50			7.50	
Dig Meth	6.60	1.40	1.40	4.50		4.50			4.50	
Dig Thr	8.60	2.10	2.10	6.00		6.00			6.00	
Dig Trp	3.00	0.60	0.60	2.00		2.00			2.00	
Dig Val	10.5	3.00	3.00	7.50		7.50			7.50	
Proportion of feed particle size (%) ⁴										
> 6.35 mm	-	1.94	92.2	-	0.94	36.5				
> 2.38 mm	4.48	58.2	7.58	2.21	25.6	5.00				
< 2.38 mm	95.5	39.9	0.16	97.8	4.58	1.32				

C: control. LMG: loose-mix ground corn. LMWC: loose-mix whole corn. SGC1: sequential ground corn 1. SGC2: sequential ground corn 2. SWC1: sequential whole corn 1. SWC2: sequential whole corn 2. In loose-mix feeding, corn and balancer diet were hand-mixed and given in the same feeding trough whereas in the sequential feeding system, corn was offered alternately with the balancer diet after the removal of the previous feeding trough. ¹Amounts of feed ingredients were similar for LMG and LMWC in loose-mix feeding. Amounts of feed ingredients were also similar for all diets in sequential feeding. ²Premix supplied the followings components (mg per kg): retinol, 1400; thiamine, 567; cobalamin, 4667; riboflavin, 1667; niacin, 10000; pyridoxine, 934; cholecalciferol, 25; tocopherol, 0.22; Zn, 46670; Cu, 6000; Fe, 30000; I, 500; Se, 200; Mn, 50000; folic acid, 133; pantothenic acid, 3667; choline, 66670. ³Nutritional values were calculated, based on Rostagno *et al.*, 2011. In loose-mix and sequential diets, 40% of corn and 60% of balancer diet were offered to reach the nutritional composition of the control diet. ⁴Particle size was determined using the sieve method in dry conditions adapted from Melcion (2000). In sequential feeding, only the particle sizes of corn (whole or coarse ground) and balancer diet were determined.

Birds and housing

Three hundred and twenty eight Hendrix ISA Brown layers were habituated to the feeding systems studied using whole corn and a balancer diet from week 16 to 18 according to Umar Faruk *et al.* (2008). The experiment was carried out in an open sided laying house. Animals were housed in wired-bottomed cages designed to accommodate four hens per cage (50cm width × 40cm depth × 40cm height) equipped with a nipple drinker. Temperature and relative humidity vary widely throughout the experimental period. The average weekly temperature during the day exceeds 30°C while it falls at night below 20°C. Photoperiod was 12L:12D at week 16 and reached 16L:8D at week 18. Light was supplemented with 4h using electric powered fluorescent lamps from week 18 and remained at this level until the end of the experiment.

The experimental period ran from 19 to 30 week-of-age. A total of 308 birds were randomly selected and divided into seven groups. Each group contained 44 birds divided into 11 replicates of 4 birds. Birds were allotted to replicates based on body weight to obtain a similar body weight between cages and treatments.

Experimental treatments

Diets were formulated to meet Brazilian tables requirements (Rostagno *et al.*, 2011) and they were mainly composed of corn and soybean meal (Table 1). A complete diet containing 11.7MJ of ME/kg and 170 g CP/kg was fed as the control diet (C). Two loose-mix (LMGC and LMWC) and four (SGC1, SGC2, SWC1, SWC2) sequential diets were provided. Sequential (S) and loose-mix (LM) groups included whole (WC) or coarse ground (GC) corn with a balancer diet containing 9.58 MJ of ME/kg and 229 g CP/kg. These diets were formulated to reach a similar supply as the control diet, assuming a ratio of 40% corn and 60% balancer diet. Each bird was offered 120 g/d of feed, corresponding to 105% of the estimated daily feed requirement (Isa, 2011). Water was given *ad libitum* throughout the experimental period.

The 3 feeding systems studied and the hours of distribution are shown Figure 1. Control and loose-mix diets were hand-fed once a day at 09h00 and the sequential diets were offered in two distributions. Since it was assumed that temperature affects feed consumption and bird performance (Mashaly *et al.*, 2004; Umar Faruk *et al.*, 2010a), two hours of distribution of corn were tested in sequential feeding. Two sequential groups (SWC1 and SGC1) got corn at 09h00 and the balancer at 15h00 whereas for the two other sequential groups (SWC2 and SGC2), corn was offered at lower temperatures at 19h00 and

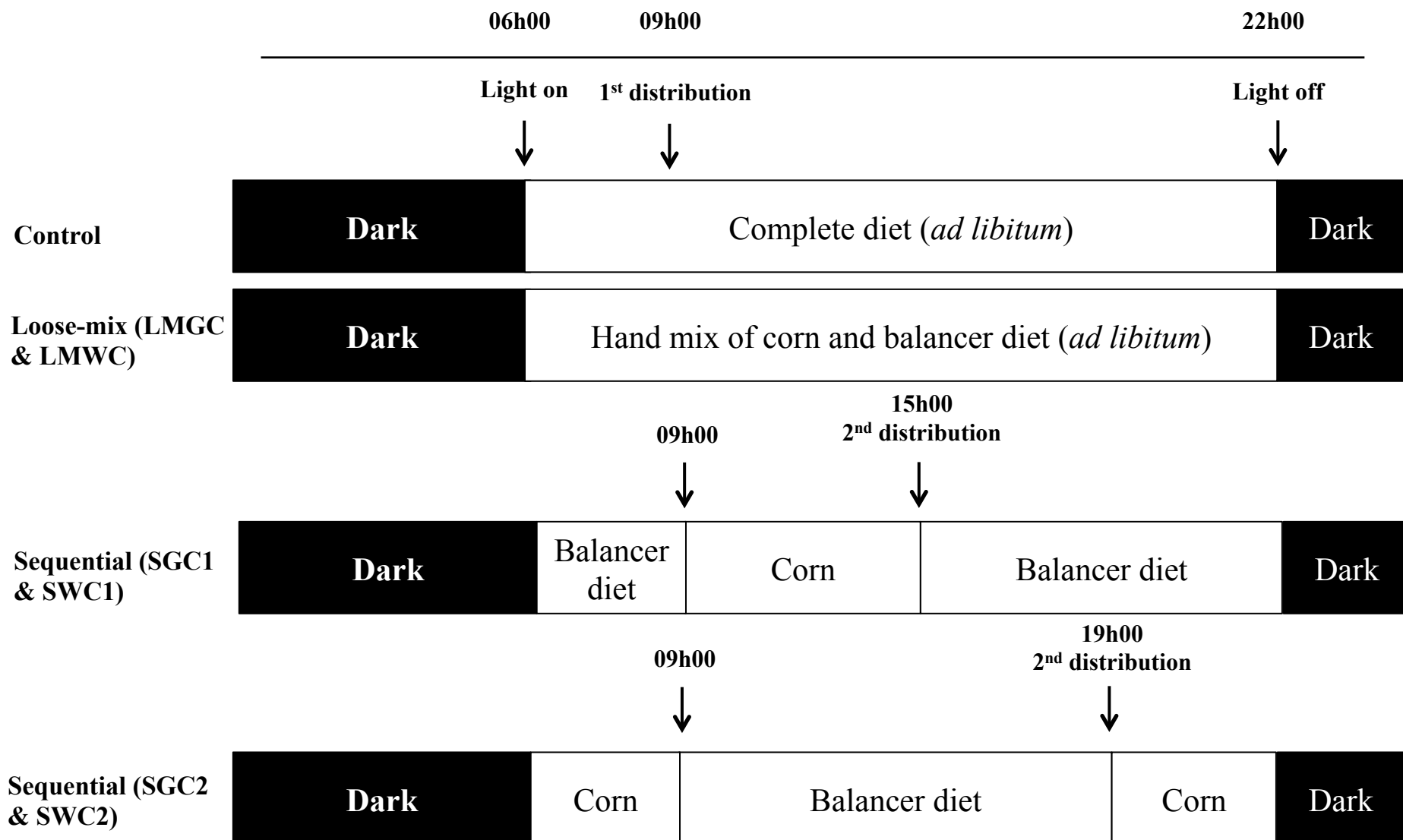


Figure 1. Illustration of the 3 feeding systems (control, loose-mix, sequential) and the hour of feed distribution. Control and loose-mix diets were hand-fed once a day at 09h00. In sequential feeding system, corn was given either in whole or coarse ground form at 09h00 and the balancer diet at 15h00 for two sequential groups (SGC1 and SWC1). For the two others sequential groups (SGC2 and SWC2), whole or coarse ground corn was offered at 19h00 and the balancer diets given at 09h00. In sequential feeding, all feeding troughs were removed before each distribution. Sequential and loose-mix diets were formulated to reach a similar supply as the control diet, assuming a ratio of 40% corn and 60% balancer diet. Each bird was offered 120 g/d of feed, corresponding to 105% of the estimated daily feed requirement.

the balancer at 09h00. In sequential feeding, two sets of feeding troughs were used, one for each fraction.

Measurements

Temperature and relative humidity. The climatic conditions of the study area (São Paulo state, Brazil) show variable temperatures between days. There are wide diurnal ranges both in temperature and relative humidity. Temperature (current, min and max) and relative humidity (current, min and max) were measured three times a day (09h00, 15h00, 19h00).

Performance. Feed intake was measured weekly as the difference between offered and leftovers. Corn and balancer intakes were measured separately in sequential treatments. Egg production was recorded daily. Egg weight was recorded twice a week. Weights of egg components (yolk, albumen, shell) were determined on a daily sample (two eggs per replicate) at 22, 25 and 28 weeks of age. Eggshells were washed and dried for 72 hours in an oven at 30 °C and weighed. Body weight was measured individually at 16, 19, 23, 27, and 30 weeks of age.

Digestive organs weights and body composition. The weight of the digestive organs was measured at the end of the experimental period to assess the effect of the feeding system and corn physical form on these organs. Seven birds per treatment randomly selected were slaughtered and weighed. The abdominal cavity was opened and small intestine, pancreas and liver were weighed. Gizzard and proventriculus were placed into an iced container (-4°C) for 24h to facilitate the removal of the surrounding fat before being emptied and weighed.

Body composition was determined at 19 and 30 weeks-of-age. At the beginning of the trial, 20 birds were sampled, slaughtered and weighed to obtain an initial body composition. Before slaughter, birds were kept for 36 h without access to feed but with free access to water. Carcasses with feathers were placed in an autoclave for 6h and ground in a cutter-slicer. Subsamples were taken from each carcass, dried for 5 days in a drying oven at 30°C and ground with a ball mill. Chemical analyses including dry matter, fat, protein ($N \times 6.25$) and ash were carried out on the subsamples according to the AOAC methods. At 30 weeks-of-age, 4 birds were randomly selected per treatment respectively in the cages having the lowest and the highest laying profile to determine a final body composition. Body fat, protein and abdominal fat contents were expressed as percentage of body weight.

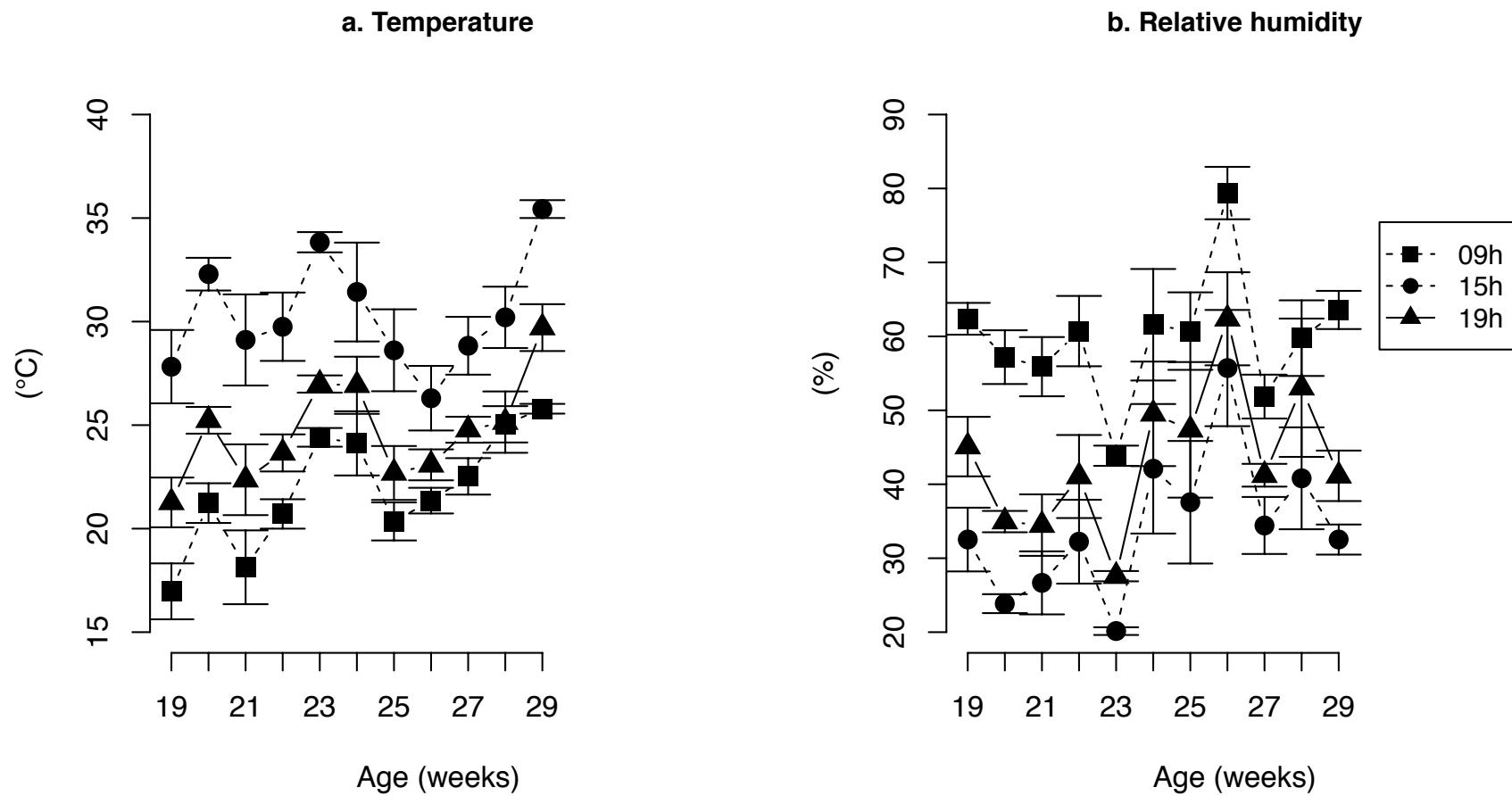


Figure 2. Evolution of average temperature (°C) and average relative humidity (%) from 19 to 29 weeks of age

Particle size analysis. Profiles of feed particle size for the experimental diets were determined at 22, 25 and 28 weeks of age using the dry sieving method adapted from Melcion (2000). A sample of 100 g of feed was passed during 3 min in the electric shaker having sieves with diameters of 6.35, 2.38, 2.00, 1.19, 0.50 mm and bottom tray (< 0.50 mm). Profiles of control, loose-mix diets and sequential fractions (corn and balancer diet) were measured.

Besides, a particle size profile of the feed leftover was performed with replicates of 100 g for each diet in control, loose-mix diets and the sequential diets fractions. Each replicate was the addition of the leftovers of 3 or 4 cages. From the diet and leftovers particles sizes profiles, the size of ingested particles was determined. The balancer diet profile was only performed at 22 weeks of age.

Feeding behaviour and egg laying dynamic. Bird behaviour was monitored at 22 and 28 weeks of age on all replicates by scan sampling (Altmann, 1974), with the observer standing in front of the cage at a distance of 1 m. Hens behaviour was recorded at 1h interval between 06h00 and 22h00. At feed distribution time (09h00, 15h00 and 19h00), behaviour recording started when all animals were fed. The following behaviour patterns were distinguished: feeding (pecking at the feed in the trough), drinking and standing. For each treatment, the percentage of birds devoted to feeding was calculated. The number of eggs laid during the observation period was also recorded to estimate egg laying dynamic.

Statistical analysis

Data analyses were performed using *R version 3.0.2* (R Core Team, 2013). Data were analysed for 3 periods related to the age of body weight measurement (1) from 19 to 22 wk, (2) from 23 to 26 wk and (3) from 27 to 29 wk. A one-way ANOVA was performed to test the treatment and the feeding systems (control vs. loose-mix vs. sequential) effects on feed consumption (feed intake, corn and balancer intakes, ME and CP intakes), laying performance and body weight. In sequential diets, a 2 × 2 factorial ANOVA was carried out to assess the effects of corn physical form (whole vs. ground) and hour of distribution (Hour 1 vs. Hour 2) on the above-mentioned data. Results were considered significantly different if $P \leq 0.05$ and a Bonferroni-Dunnet pairwise comparison was used to compare differences between means. Because too few hens were laying in the first period (19 to 22 weeks-of-age), feed conversion ratio (FCR) was submitted to a Kruskal-Wallis test. Digestive organs weight and body composition data were also analysed with a Kruskal-Wallis test due to a non-normality distribution of these data ($P \leq 0.05$ for Shapiro-Wilk

Table 2. Effect of treatment, feeding system, corn form and hour of distribution of corn on the feed consumption, ME and CP intakes of laying hens fed from 19 to 29 weeks old, whole or coarse ground corn sequentially (S) or in loose-mix (LM) with a balancer diet

	Loose-mix diets			Sequential diets				SEM	General and loose-mix effects			Sequential treatments		
	C ¹	LMGC	LMWC	SGC1	SGC2	SWC1	SWC2		Treatment	C vs. LM vs. S	LMGC vs. LMWC	Corn form in S	Hour in S	Corn form × Hour in S
Total feed intake (g/b/d)	N = 11	N = 11	N = 11	N = 11	N = 11	N = 11	N = 11							
Week 19-22	72.6	70.9	70.5	67.3	69.1	68.8	70.9	1.57	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Week 23-26	83.3 ^a	78.1 ^a	69.7 ^b	65.6 ^b	57.8 ^c	66.9 ^b	66.8 ^b	1.54	***	***	***	**	*	*
Week 27-29	91.7 ^a	81.4 ^b	69.6 ^c	68.0 ^c	57.7 ^d	70.1 ^c	66.3 ^c	2.07	***	***	***	*	**	NS
Overall (Wk 19-29)	82.5 ^a	76.8 ^A	69.9 ^B	67.0 ^{bc}	61.5 ^C	68.6 ^b	68.0 ^B	0.82	***	***	***	*	<i>P</i> = 0.06	NS
Corn intake (g/b/d)														
Week 19-22				42.1 ^a	41.2 ^a	36.2 ^b	32.7 ^b	1.03	***			***	*	NS
Week 23-26				37.4 ^a	37.7 ^a	27.6 ^b	30.3 ^b	1.19	***			***	NS	NS
Week 27-29				36.7 ^a	38.1 ^a	28.8 ^b	34.2 ^a	1.20	***			***	**	NS
Overall (Wk 19-29)				38.9 ^a	39.1 ^a	31.0 ^b	32.2 ^b	0.70	***			***	NS	NS
Balancer diet intake (g/b/d)														
Week 19-22				25.3 ^a	27.9 ^{ab}	32.6 ^b	38.2 ^c	1.49	***			***	**	NS
Week 23-26				28.2 ^a	20.0 ^b	39.3 ^c	36.5 ^c	1.74	***			***	**	NS
Week 27-29				31.3 ^a	19.6 ^b	41.3 ^c	32.1 ^a	2.25	***			***	***	NS
Overall (Wk 19-29)				28.0 ^a	22.8 ^b	37.4 ^c	35.9 ^c	1.07	***			***	**	<i>P</i> = 0.08
ME intake (MJ/b/d)														
Week 19-22	0.85 ^{ab}	0.83 ^{ab}	0.83 ^b	0.87 ^{ab}	0.88 ^a	0.85 ^{ab}	0.85 ^{ab}	0.01	*	*	NS	<i>P</i> = 0.09	NS	NS
Week 23-26	0.98 ^a	0.91 ^a	0.82 ^{bc}	0.83 ^B	0.75 ^C	0.79 ^{bc}	0.80 ^{bc}	0.02	***	***	***	NS	NS	*
Week 27-29	1.07 ^a	0.95 ^b	0.81 ^{cd}	0.85 ^C	0.76 ^D	0.82 ^{cd}	0.82 ^{cd}	0.02	***	***	***	NS	*	<i>P</i> = 0.09
Overall (Wk 19-29)	0.96 ^a	0.90 ^B	0.82 ^C	0.85 ^C	0.80 ^D	0.82 ^{cd}	0.83 ^{cd}	0.01	***	***	***	NS	*	*
CP intake (g/b/d)														
Week 19-22	12.3 ^{ad}	12.1 ^{ad}	12.0 ^{ad}	9.2 ^b	9.7 ^{bc}	10.4 ^{cd}	11.3 ^d	0.26	***	***	NS	***	*	NS
Week 23-26	14.2 ^a	13.3 ^a	11.8 ^B	9.5 ^c	7.7 ^d	11.1 ^{be}	10.5 ^{cE}	0.32	***	***	***	***	**	NS
Week 27-29	15.6 ^a	13.8 ^a	11.8 ^{bc}	10.2 ^{ce}	7.6 ^d	11.6 ^{ce}	9.9 ^e	0.42	***	***	***	***	***	NS
Overall (Wk 19-29)	13.9 ^a	13.0 ^b	11.9 ^C	9.6 ^d	8.4 ^e	11.0 ^f	10.6 ^f	0.20	***	***	***	***	***	<i>P</i> = 0.07

C: control. LMG: loose-mix ground corn. LMWC: loose-mix whole corn. SGC1: sequential ground corn 1. SGC2: sequential ground corn 2. SWC1: sequential whole corn 1. SWC2: sequential whole corn 2. ¹A complete diet was fed ad libitum as control between 19 and 29 weeks old. Hens in loose-mix were offered either whole or coarse ground corn hand-mixed with the balancer diet in the same feeding trough along the day. Two sequential groups received the whole (SWC1) or the ground corn (SGC1) at 09h00 and the balancer diet at 15h00 whereas. SWC2 and SGC2 groups were offered the corn at 19h00 and the balancer at 09h00 from 19 and 29 weeks old. Loose-mix and sequential diets were formulated to reach a daily nutritional balance as the control diet, assuming a ratio of 40% of corn and 60% of the balancer diet. In loose-mix feeding, corn and balancer diet were hand mixed and given in the same feeding trough whereas in the sequential feeding system, corn was offered alternately with the balancer diet after the removal of the previous feeding trough. a, b, c: values within the same line with no common superscripts differ significantly at $P \leq 0.05$; A, B, C: have a trend at $P < 0.10$. *** $P < 0.001$; ** $P < 0.01$; * $P \leq 0.05$. NS not significant at $P > 0.10$.

test). A multiple comparisons post-hoc test (Siegel and Castellan, 1988) was realized when the overall model was found significant at $P \leq 0.05$.

For particle size profiles, ingested feed particles were summed in 3 groups defined as small particles (< 2.38 mm), average particles (> 2.38 mm) and big particles (> 6.35 mm). These data were submitted to the similar one-way and two-ways ANOVA as above.

Data for scan sampling were divided into 4 time steps according to the hour of distribution of feed: 09h00-09h15, 15h00 to 15h15, 19h00 to 19h15 and a last time step involving all periods out of feed distribution. The same statistical tests were performed at each time step on the percentage of birds eating as for the performance data. Differences between time steps for each treatment were assessed using repeated measures ANOVA. Besides, to determine whether sequential and loose-mix feeding systems induced changes in egg laying dynamic, the mean hour of oviposition was calculated according to Jordan *et al.* (2010). One-way or two-ways ANOVA were performed at 22 and 28 weeks-of-age as above.

RESULTS

Climatic conditions throughout the experimental period (Figure 2)

Temperature and relative humidity varied widely throughout the experiment (Fig. 2). The trial was carried out during winter. Temperatures were lower at the beginning of the trial and increased with broad variations between and within days all along the experiment. Daily temperature reached $38 \pm 0.33^{\circ}\text{C}$ and dropped down to $6.2 \pm 0.33^{\circ}\text{C}$. Highest temperatures were recorded at 15h00 and varied from 26°C to 35°C while the coolest were at 09h00. Relative humidity was higher at 09h00 and lower at 15h00. Increase in relative humidity mostly matched a decrease in temperature. Relative humidity ranged from $90 \pm 1.13\%$ to $25.3 \pm 1.09\%$.

Feed consumption and laying performance (Tables 2 and 3)

Average total feed intake was affected by treatments (Table 2). Significant reduction was observed with sequential diets (66.3 g/b/d) compared to loose-mix (73.4 g/b/d) and control (82.5 g/b/d) ones. In sequential feeding, hens offered whole corn increased the total feed intake compared to ground coarse fed group whereas in the loose-mix system, the opposite was observed. The hour of distribution of corn tended to affect total feed intake with numerically lower values obtained for SGC2 and SWC2 ($P = 0.06$). In sequential feeding, diets fractions were consumed in different proportions and affected by the grain form. Balancer diet intakes were higher with whole corn (54% of the total feed intake)

Table 3. Effect of treatment, feeding system, corn form and hour of distribution of corn on the laying performance and feed conversion ratio of hens fed from 19 to 29 weeks old whole or coarse ground corn sequentially (S) or in loose-mix (LM) with a balancer diet

	Loose-mix diets			Sequential diets				SEM	General and loose-mix effects			Sequential treatments		
	C	LMGC	LMWC	SGC1	SGC2	SWC1	SWC2		Treatment	C vs. LM vs. S	LMGC vs. LMWC	Corn form in S	Hour in S	Corn form × Hour in S
Egg production (egg/b/d)	N = 11	N = 11	N = 11	N = 11	N = 11	N = 11	N = 11							
Week 19-22	0.35	0.28	0.26	0.29	0.20	0.30	0.30	0.03	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Week 23-26	0.79 ^a	0.63 ^b	0.55 ^b	0.49 ^C	0.39 ^D	0.54 ^{bc}	0.59 ^B	0.04	***	***	NS	**	NS	NS
Week 27-29	0.82 ^a	0.65 ^b	0.55 ^{bc}	0.46 ^{cd}	0.35 ^d	0.54 ^{bc}	0.51 ^c	0.05	***	***	NS	**	NS	NS
Overall (Wk 19-29)	0.66 ^a	0.52 ^{ab}	0.45 ^B	0.41 ^{bc}	0.31 ^C	0.46 ^b	0.47 ^b	0.02	***	***	NS	**	NS	<i>P</i> = 0.10
Egg weight (g)														
Week 20-22	50.7 ^a	47.4 ^{ab}	48.6 ^{ab}	46.9 ^{ab}	43.6 ^b	49.3 ^{ab}	47.3 ^{ab}	1.05	**	*	NS	**	*	NS
Week 23-26	55.2 ^A	53.5 ^{ab}	52.3 ^{ab}	50.4 ^B	49.1 ^b	53.4 ^{ab}	50.6 ^{ab}	1.09	**	**	NS	<i>P</i> = 0.07	<i>P</i> = 0.09	NS
Week 27-29	57.7 ^a	55.0 ^a	56.5 ^a	53.8 ^{ab}	49.1 ^b	56.0 ^a	53.4 ^{ab}	1.08	***	**	NS	*	**	NS
Overall (Wk 20-29)	54.6 ^a	52.0 ^{ab}	52.5 ^{ab}	50.4 ^{bC}	47.3 ^C	52.9 ^{ab}	50.4 ^{bc}	0.42	***	***	NS	***	**	NS
Egg mass (g/b/d)														
Week 20-22	18.0	13.4	12.7	13.9	9.30	15.0	14.3	1.75	<i>P</i> = 0.07	<i>P</i> = 0.06	NS	NS	NS	NS
Week 23-26	43.8 ^a	33.7 ^{ab}	29.3 ^{bc}	25.0 ^{bc}	19.3 ^C	29.1 ^{bc}	29.9 ^B	2.46	***	***	NS	**	NS	NS
Week 27-29	47.3 ^A	35.8 ^B	31.1 ^b	24.9 ^{bc}	17.9 ^C	30.1 ^B	27.7 ^{bc}	2.67	***	***	NS	**	NS	NS
Overall (Wk 20-29)	36.4 ^a	27.6 ^b	24.4 ^b	21.3 ^{bc}	15.5 ^C	24.7 ^b	24.0 ^b	1.03	***	***	NS	***	<i>P</i> = 0.07	NS
FCR														
Week 20-22 ¹	4.38	5.46	6.84	6.56	14.51	5.76	5.56	1.39	NS	<i>P</i> = 0.08	NS	NS	NS	
Week 23-26	1.91 ^a	2.38 ^{ab}	2.65 ^{abc}	2.93 ^{bc}	3.40 ^C	2.38 ^{ab}	2.35 ^{ab}	0.19	***	**	NS	**	NS	NS
Week 27-29	1.98 ^a	2.36 ^a	2.37 ^a	2.95 ^A	4.17 ^B	2.41 ^a	2.60 ^a	0.23	***	**	NS	**	<i>P</i> = 0.06	NS
Overall (Wk 20-29)	2.76 ^a	3.40 ^a	3.95 ^a	4.15 ^A	7.36 ^B	3.51 ^a	3.51 ^a	0.31	**	<i>P</i> = 0.08	NS	*	NS	NS

C: control; LMG: loose-mix ground corn; LMWC: loose-mix whole corn; SGC1: sequential ground corn 1; SGC2: sequential ground corn 2; SWC1: sequential whole corn 1; SWC2: sequential whole corn 2. ¹FCR data of the first period (Wk 20-22) was submitted to a Kruskal-Wallis test because of the lower number of hens laying in that period. a, b, c: values within the same line with no common superscripts differ significantly at $P \leq 0.05$; A, B, C: have a trend at $P < 0.10$. *** $P < 0.001$; ** $P < 0.01$; * $P \leq 0.05$. NS not significant at $P > 0.10$.

compared to ground corn (40% of the total feed intake). No effect of the hour of distribution was observed on the corn intake but it affected the balancer diet intake with lower consumption from 9h00 to 19h00 corresponding to diets SGC2 and SWC2.

Overall ME and CP intakes were significantly ranked: lowest values for sequential diets followed by loose-mix diets and highest ones in control. ME and CP intakes were lower with LMWC compared to LMGC and C. Within the sequential treatments, ME intake was significantly lower in SGC2 than in SGC1 while the opposite was observed between SWC1 and SWC2. CP intake was reduced for sequentially ground corn fed birds compared to control and loose-mix diets.

Egg production differed between treatments and increased with age for control, loose-mix and sequential diets, except for the last period for the sequential feeding system (Table 3). Egg production and egg mass were lower with sequential diets compared to loose-mix and control. For egg production, C was similar to LMGC and higher than LMWC. However for egg mass, both LMGC and LMWC were significantly lower than C. Regarding corn form and hour of distribution effects on egg production and egg mass, SGC2 was similar to SGC1 but lower than SWC1 and SWC2. No difference of egg production and egg mass was observed between SGC1, SWC1 and SWC2. Egg weight was significantly higher for control and loose-mix diets compared to sequential ones. Ground corn fed birds in sequential feeding showed a smaller egg weight compared to sequential whole corn diets. This reduction was more pronounced when corn was offered in the evening. Egg production, egg weight and egg mass were similar between LMGC and LMWC. The overall model showed a significant effect of treatments on FCR. However, the only significant difference was observed between SGC2 and all other treatments. Feeding systems tended to affect FCR ($P = 0.08$) with lower value in control (2.76) followed by loose-mix (3.67) and sequential (4.63). Within the sequential diets, the numerically lowest FCR were obtained with the whole corn diets (3.51 in whole vs. 5.75 in ground corn).

Egg components proportions (Table 4)

At 29 weeks-of-age, corn shape affected yolk weight in sequential feeding. Sequential distribution of whole corn resulted in higher albumen proportion. Heavier egg albumen was obtained when corn was offered at 19h00 independently of its physical form (SGC2 and SWC2). Eggshell proportion was affected by treatments at weeks 25 and 29. At week 29, eggshell was higher in loose-mix feeding followed by control and sequential. Throughout the experimental period, the lowest eggshell proportions were obtained when balancer is offered from 09h00 to 19h00, with no influence of the corn physical form.

Table 4. Effect of treatment, feeding system, corn form and hour of distribution of corn on egg contents of hens fed from 19 to 29 wk old, whole or coarse ground corn sequentially (S) or in loose-mix (LM) with a balancer diet

	Loose-mix diets			Sequential diets				SEM	General and loose-mix effects			Sequential treatments		
	C	LMGC	LMWC	SGC1	SGC2	SWC1	SWC2		Treatment	C vs. LM vs. S	LMGC vs. LMWC	Corn form in S	Hour in S	Corn form × Hour in
Egg yolk (%)	N = 22	N = 22	N = 22	N = 22	N = 22	N = 22	N = 22							
Week 22	20.7	21.8	21.5	21.6	22.2	21.3	21.6	0.37	NS	<i>P</i> = 0.07	NS	NS	NS	NS
Week 25	20.1	20.6	21.2	21.7	21.1	20.5	20.9	0.37	NS	NS	NS	<i>P</i> = 0.07	NS	NS
Week 29	21.7	22.8	22.2	23.5	22.9	21.7	22.3	0.43	<i>P</i> = 0.07	NS	NS	*	NS	NS
Egg albumen (%)														
Week 22	69.4	68.0	68.4	68.2	68.0	68.4	68.6	0.45	NS	<i>P</i> = 0.06	NS	NS	NS	NS
Week 25	69.7	68.9	69.6	68.2	70.2	69.4	69.7	0.46	NS	NS	NS	NS	*	<i>P</i> = 0.10
Week 29	68.5	66.8	68.0	66.8	68.1	68.2	68.9	0.51	*	NS	NS	*	<i>P</i> = 0.08	NS
Eggshell (%)														
Week 22	9.81	10.14	10.04	10.11	9.80	10.33	9.80	0.22	NS	NS	NS	NS	<i>P</i> = 0.08	NS
Week 25	10.23 ^{ab}	10.44 ^A	9.21 ^{Bc}	10.02 ^{abc}	8.68 ^c	10.07 ^{abc}	9.39 ^{abc}	0.25	**	NS	*	NS	**	NS
Week 29	9.81 ^{aC}	10.36 ^a	9.73 ^{aC}	9.75 ^{aC}	8.95 ^{BC}	10.10 ^A	8.73 ^B	0.21	***	*	*	NS	***	NS

C: control; LMGC: loose-mix ground corn; LMWC: loose-mix whole corn; SGC1: sequential ground corn 1; SGC2: sequential ground corn 2; SWC1: sequential whole corn 1; SWC2: sequential whole corn 2. a, b, c: values within the same line with no common superscripts differ significantly at $P \leq 0.05$; A, B, C: have a trend at $P < 0.10$. *** $P < 0.001$; ** $P < 0.01$; * $P \leq 0.05$. NS not significant at $P > 0.10$.

Body weight, body composition and digestive organs (Table 5)

Body weight increased from 19 to 23 weeks of age and did not differ between treatments (Table 5). A decrease in body weight was observed for birds in loose-mix and sequential feeding from week 23. However, no differences were found between loose-mix and control at week 27 and 30. Hens fed sequentially were lighter in body weight (1550 g) when compared with those fed loose-mix (1625 g) and control (1679 g). At week 30, SGC2 and SWC2 body weight tended to be lower than SGC1 and SWC1 ($P = 0.06$).

Average values presented Table 5 stressed that neither the feeding systems, nor corn physical form and hour of distribution of corn affected body fat and protein content. Abdominal fat tended to be affected by the grain shape in loose-mix ($P = 0.08$) while no other effect was found.

At the end of the trial, significant differences in the weight of digestive organs were observed for gizzard and small intestine. Hens with the control diet had a lighter gizzard than sequential based diets. The opposite was found for small intestine. Offering ground corn in sequential feeding resulted in a lower small intestine weight compared to whole corn.

Size of fed particles (Table 6)

The average particle size of ingested feed (size > 2.38 mm) was significantly influenced by treatment. Birds in C and LMGC consumed more small particles (< 2.38 mm) than other treatments, LMGC eating less small particles than C. In sequential diets, ground corn fed birds ate more small particles than whole corn fed birds, with the highest value being with SGC1. This consumption was also affected by the hour of distribution.

For the average particles (size > 2.38 mm), LMGC is higher than all other diets. Birds offered whole corn sequentially or in loose-mix consumed a similar amount of average particles (> 2.38 mm) while in ground corn, SGC1 and SGC2 were similar but both lower than LMGC. There were no big particles (> 6.35 mm) consumed in C, LMGC, SGC1 and SGC2. Hens offered whole corn sequentially or in loose-mix, consumed similar levels of big particles (> 6.35 mm) which represent around 42%, 43% and 44% (respectively for LMWC, SWC1 and SWC2) of total feed intake.

Feeding behaviour and egg laying dynamic (Table 7 and Figure 3)

Table 5. Effect of treatment, feeding system, corn form and hour of distribution of corn on body weight, body composition and digestive organs weight of hens fed from 19 to 29 weeks of age, whole or coarse ground corn sequentially (S) or in loose-mix (LM) with a balancer diet

	Loose-mix diets			Sequential diets				SEM	General and loose-mix effects			Sequential treatments		
	C	LMGC	LMWC	SGC1	SGC2	SWC1	SWC2		Treatment	C vs. LM vs. S	LMGC vs. LMWC	Corn form in S	Hour in S	Corn form × Hour in S
Body weight (g)	N = 44	N = 44	N = 44	N = 44	N = 44	N = 44	N = 42 ³							
Week 19	1458	1479	1496	1496	1439	1466	1482	20.35	NS	NS	NS	NS	NS	P = 0.08
Week 23	1633	1612	1664	1610	1585	1615	1628	20.50	NS	NS	P = 0.07	NS	NS	NS
Week 27	1658 ^a	1608 ^{ab}	1645 ^a	1574 ^{ab}	1515 ^b	1578 ^{ab}	1582 ^{ab}	24.32	**	**	NS	NS	NS	NS
Week 30 ¹	1679 ^A	1611 ^{ab}	1640 ^{ab}	1565 ^{bc}	1505 ^c	1580 ^{Bc}	1553 ^{bc}	23.80	**	**	NS	NS	P = 0.06	NS
Final body composition (%)	N = 4	N = 4	N = 4	N = 4	N = 4	N = 4	N = 4							
Fat	21.6	18.4	17.9	20.4	18.9	16.8	19.9	0.90	P = 0.07	NS	NS	NS	NS	
Protein	18.1	20.2	20.1	18.0	20.4	20.8	19.7	0.88	NS	NS	NS	NS	NS	
Abdominal fat	1.79	1.35	2.33	2.11	2.68	2.22	1.51	0.42	NS	NS	P = 0.08	NS	NS	
Digestive organs weight (% BW)	N = 7	N = 7	N = 7	N = 7	N = 7	N = 7	N = 7							
Gizzard	1.66 ^a	1.88 ^{ab}	2.02 ^{ab}	2.15 ^b	2.35 ^b	2.10 ^{ab}	2.21 ^b	0.10	**	**	NS	NS	NS	
Small intestine	2.17 ^a	1.77 ^{ab}	1.95 ^{ab}	1.75 ^{ab}	1.60 ^b	1.81 ^{ab}	1.90 ^{ab}	0.08	**	**	NS	*	NS	
Pancreas	0.22	0.23	0.20	0.21	0.18	0.20	0.21	0.01	NS	NS	NS	NS	NS	
Liver	2.65	2.58	2.88	2.90	2.26	2.54	2.79	0.20	NS	NS	NS	NS	NS	

C: control; LMGC: loose-mix ground corn; LMWC: loose-mix whole corn; SGC1: sequential ground corn 1; SGC2: sequential ground corn 2; SWC1: sequential whole corn 1; SWC2: sequential whole corn 2. ¹Body weight was measured on the first day of week 30. a, b, c: values within the same line with no common superscripts differ significantly at $P \leq 0.05$; A, B, C: have a trend at $P < 0.10$. *** $P < 0.001$; ** $P < 0.01$; * $P \leq 0.05$. NS not significant at $P > 0.10$.

Feed distribution induced three peaks in feeding behaviour (Table 7). For each treatment, higher percentages of hens eating were obtained at the time of distribution of diets than in period out of distribution. From 19h00 to 19h15, birds pecking in the trough were higher in C and LMGC diets than other diets. Birds in LMWC had the higher level of consumption from 09h00 to 09h15. In sequential feeding, birds showed a preference for ground corn consumption, independently to the hour of its distribution. The highest percentage of feeding behaviour in sequentially ground corn fed groups was observed when corn was offered at 09h00. Conversely, higher levels were obtained for SWC1 when balancer was offered (from 09h00 to 09h15 and 15h00 to 15h15) whereas SWC2 resulted in a similar daily feeding rhythm at all feed distribution times. Besides, comparison at each time step showed no difference between feeding systems except for the period out of feed distribution where sequential resulted in a lower proportion of birds eating (29.3% of birds), compared to loose-mix (37.0%) and control (41.8%). From 09h00 to 09h15, the number of birds eating in SGC1 was higher than other treatments. SGC2 was lower than SWC1 from 15h00 to 15h15 while there was a similar proportion of laying hens devoted to feeding in other treatments. The third period of was characterized by a lower level of birds eating in SGC1 compared to C.

Treatments significantly influenced time of oviposition (Fig. 3). At week 22, hens in SGC2 reached the peak of laying approximately at 09h00 while in other treatments, eggs were laid between 1 and 2 hours later. No feeding system effect was obtained at week 22. In sequential diets, birds offered corn in the evening laid eggs earlier than birds offered corn from 09h00 to 15h00. At week 28, sequential feeding resulted in earlier time of oviposition compared to loose-mix and control. However, no effect of the corn form was found in sequential treatments. Hens offered corn from 09h00 to 15h00 laid eggs later than hens in other treatments.

DISCUSSION

The low total feed intake, laying performance and body weight compared to performance obtained in neutral condition might be explained by the high and variable environmental temperatures and relative humidity within and between days, all along the experiment in agreement with Mashaly *et al.* (2004) and Syafwan *et al.* (2012). When temperatures gradually rise and remain high for an extended period, birds can acclimatize and maintain egg production and body weight at satisfactory levels. However, heat changes on short period jeopardize birds' ability to acclimatize (Daniel and Balnave, 1981). Thus, reduced animal performance could be a result of combination of heat stress and absolute levels on

Table 6. Particle size of feed ingested by laying hens fed from 19 to 29 weeks of age, whole or coarse ground corn sequentially (S) or in loose-mix (LM) with a balancer diet

Particle size (g/b/d)	Small particles (<2.38 mm)	Average particles (>2.38 mm)	Big particles (>6.35 mm)
Treatments			
C	83.3 ^a	1.16 ^a	0.00 ^a
LMGC	52.8 ^B	25.14 ^b	1.07 ^a
LMWC	37.4 ^c	3.27 ^{ac}	29.3 ^b
SGC1	46.0 ^D	21.2 ^d	0.82 ^a
SGC2	39.7 ^{cd}	21.4 ^d	0.81 ^a
SWC1	35.8 ^c	3.92 ^c	29.3 ^b
SWC2	34.8 ^c	2.30 ^{ac}	29.7 ^b
SEM	1.59	0.44	0.57
<i>General and loose-mix effects</i>			
<i>Treatment</i>	***	***	***
<i>C vs. LM vs. S</i>	***	***	***
<i>LMGC vs. LMWC</i>	***	***	***
<i>Sequential treatments</i>			
<i>Corn form in S</i>	***	***	***
<i>Hour in S</i>	*	NS	NS
<i>Corn form × Hour in S</i>	NS	NS	NS

C: control; LMGC: loose-mix ground corn; LMWC: loose-mix whole corn; SGC1: sequential ground corn 1; SGC2: sequential ground corn 2; SWC1: sequential whole corn 1; SWC2: sequential whole corn 2. a, b, c: values within the same column with no common superscripts differ significantly at $P \leq 0.05$; A, B, C: have a trend at $P < 0.10$. *** $P < 0.001$; ** $P < 0.01$; * $P \leq 0.05$. NS: not significant at $P > 0.10$.

reducing feed intake, related to exposure to heat under tropical conditions (Renaudeau *et al.*, 2012). Feed intake can decrease by 4% per degree above the thermoneutral zone, as showed in a quantitative review by Mardsen and Morris (1987) and Travel *et al.* (2010). Moreover, egg production declines faster at 30°C since total nutrient intake is insufficient to support normal rate of lay (Balnave and Brake, 2005). Lastly, high relative humidity hampers adaptation to extreme of temperatures (Daniel and Balnave, 1981). Simultaneous effect of both temperature and relative humidity might exacerbate this reduction in nutrient intake (Daniel and Balnave, 1981; Lin *et al.*, 2005).

Sequential feeding resulted in lower feed consumption compared to loose-mix and control consistently with Umar Faruk *et al.* (2010a, b; 2011) and Traineau *et al.* (2013). However, the decrease was much higher than in previous studies and the low observed feed intake had led to much lower performance. Egg laying performance was not in accordance with previous works with lower egg production and egg weight in sequential feeding relative to loose-mix and control. With hot temperatures, sequential fed birds consumed fewer nutrients than the control and laid accordingly fewer eggs. Higher energy content of the diet via lipid addition has been reported to overcome the effect of heat stress (Usayran *et al.*, 2001; Kleyn, 2013). Since fat intake in control was higher (3.40 g/b) than sequential one (2.56 g/b), it might lead to a possible difference in heat increment. Besides, feed conversion ratio tended be different between feeding systems with higher values in sequential compared to loose-mix and control, inconsistently with previous results (Traineau *et al.*, 2013, Batonon, Traineau *et al.*, 2014). The lack of statistical significance difference was due to the huge variability of laying performance in sequential feeding with FCR ranging from 1.69 to 56.8 compared to loose-mix (1.20 to 17.31) and complete (1.63 to 7.01) feeding systems. This suggests that some birds in sequential feeding have never laid during the experimental period. It might be attributed to the much lower intakes of ME and CP in sequential and loose-mix feeding compared to control diet, therefore leading to a lack of dilution of maintenance and heat increment impacts (Latshaw and Moritz, 2009). This is also in line with findings of Traineau *et al.* (2014) who showed that in sequential feeding system low levels of ME and CP intakes induced deficiencies and poor performance in laying hens. Even though, birds fed sequentially had lower body weight compared to conventional feeding in agreement with Traineau *et al.* (2013) and Batonon, Traineau *et al.* (2014). These authors suggest that sequentially fed birds have lower fat deposition, which is consistent with our numerically lower fat content results.

Regarding corn intake, sequentially fed birds increased the consumption up to 60% of the daily supply in ground corn, which is in contradiction with previous results (Umar Faruk *et*

Table 7. Proportion of laying hens devoted to feeding by treatment and time step during the scan sampling

Feeding (% of total number of birds)	09h00-09h15	15h00-15h15	19h00-19h15	Period out of feed distribution	Time step effect ¹
Treatment					
C	46.6 ^{a,x}	48.9 ^x	67.0 ^{a,y}	41.8 ^{A,x}	**
LMGC	51.1 ^{a,x}	51.1 ^x	61.4 ^{ab,y}	39.2 ^{aB,x}	**
LMWC	56.8 ^{A,x}	45.4 ^y	48.8 ^{ab,y}	34.9 ^{Bc,y}	**
SGC1	84.1 ^{B,y}	48.9 ^z	40.9 ^{b,xz}	29.3 ^{cd,x}	***
SGC2	38.6 ^{a,x}	37.1 ^x	63.6 ^{ab,y}	27.2 ^{D,x}	***
SWC1	32.9 ^{a,X}	68.2 ^y	54.9 ^{ab,Y}	27.1 ^{D,x}	***
SWC2	51.1 ^{a,X}	52.3 ^x	54.5 ^{ab,x}	34.0 ^{Bc,Y}	***
SEM	6.57	6.41	6.07	1.99	
General and loose-mix effects					
Treatment	***	$P = 0.06$	*	***	
C vs. LM vs. S	NS	NS	NS	***	
LMGC vs. LMWC	NS	NS	*	NS	
Sequential treatments					
Corn form in S	**	**	NS	NS	
Hour in S	*	*	$P = 0.09$	NS	
Corn form × Hour in S	***	NS	$P = 0.08$	*	

C: control; LMGC: loose-mix ground corn; LMWC: loose-mix whole corn; SGC1: sequential ground corn 1; SGC2: sequential ground corn 2; SWC1: sequential whole corn 1; SWC2: sequential whole corn 2. ¹Repeated measures ANOVA were performed on data of each treatment to test the effect of period of feeding on the behaviour. a, b, c: values within the same column with no common superscripts differ significantly at $P \leq 0.05$. x, y, z: means within the same line with no common superscripts differ significantly at $P \leq 0.05$. Capital letters superscripts (A, B, C, X, Y, Z) have a trend at $P < 0.10$. *** $P < 0.001$; ** $P < 0.01$; * $P \leq 0.05$. NS: not significant at $P > 0.10$.

al., 2011; Traineau *et al.*, 2013) where cereal fraction did not usually exceed 45% of the overall intake. Higher consumption in coarse ground corn groups might be connected to the low retention time of smaller particles in the gizzard compared to larger particles (Vergara *et al.*, 1989): half-emptying time in the gizzard is 6.1 h with large particles and 3.1 h for small ones. As soon as the gizzard is empty, birds tended to ingest more feed (Pacheco *et al.*, 2013). However, offering corn at different times in a day did not influence its consumption but decreased balancer intake contrary to the expected better intake at neutral temperatures. Additionally, in sequential feeding, ground corn resulted in lower laying performance simultaneously with a lower protein-mineral fraction intake as shown in feeding behaviour analysis. Optimal laying performance is reached when there is a sufficient supply in dietary protein. Though, protein should not theoretically affect bird's response as long as all the amino acids are supplied at required level and there is no antagonism (Keshavarz, 2003; Moghaddam *et al.*, 2012).

Furthermore, whole corn fed sequentially was more efficient in laying performance than ground corn whereas the opposite was observed in loose-mix. In this latter feeding system, there was particle sorting, since coarse ground or whole grains were hand-mixed with the balancer diet (Dezat *et al.*, 2009). Birds in these treatments preferentially consumed feed particles sufficiently large to be picked up efficiently by their beaks (Picard *et al.*, 1997; Umar Faruk *et al.*, 2011). Whole corn was easier to pick than ground one and its longer retention time in gizzard could explain the lower feed intake in LMWC, as observed in whole vs. ground wheat by Umar Faruk *et al.* (2011). Since there was less heterogeneity in LMGC, the apparent preference for large particles was less obvious, leading to an improved FCR (Portella *et al.*, 1988). Consequently, the use of ground corn has more benefit in loose-mix feeding system than whole corn.

Another aim was to evaluate the effects of feeding systems on hen behaviour and oviposition time. Consistently with Jordan *et al.*, (2010), sequential feeding induced three peaks in daily rhythm of time feeding for all birds: they ate more feed immediately after distribution (morning, afternoon and evening), and less a few hours later as previously observed (Choi *et al.*, 2004; Jordan *et al.*, 2010). However, a delay in mean oviposition time was observed for sequential whole corn fed birds. Birds in SGC2 laid 2h earlier than other birds with only a few numbers of them laying. Jordan *et al.* (2010) and Keshavarz (1998) assumed that delayed mean oviposition time is related to the chronobiology of laying hens *i.e.* the appropriate nutrients supply at the adequate moment.

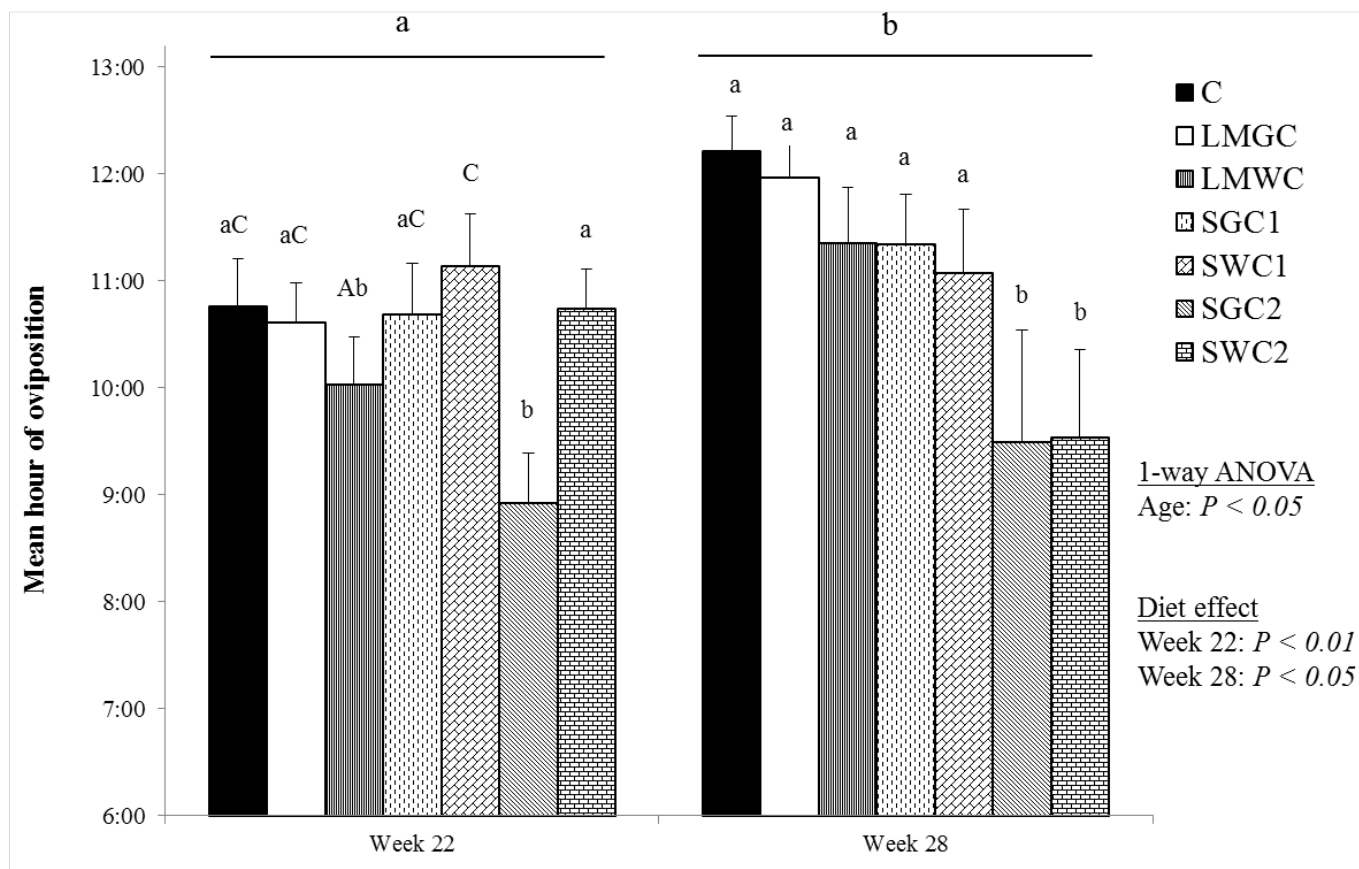


Figure 3. Mean hour of oviposition of hens fed from 19 to 29 weeks of age, control diet and whole or coarse ground corn sequentially (S) or in loose-mix (LM) with a balancer diet

The mean hour of oviposition was calculated according to Jordan *et al.* (2010). A one-way ANOVA was performed at 22 and 28 weeks-of-age to assess the treatment effect on the mean hour of oviposition. A 2×2 factorial ANOVA was used for sequential treatments to evaluate the impact of both corn physical form and hour of distribution of corn on egg laying kinetics. All data were combined to determine the age effect on the mean hour of oviposition.

Utilization of whole and ground corn in sequential and loose-mix feeding systems have negative impacts on laying hen's performance. However, warm and varying conditions throughout the experiment pointed out the difficulties to fully manage birds with these innovative feeding systems. Therefore, further investigations are required on the best ways to reduce heat stress and enhance bird plasticity with these feeding techniques. Among these techniques, feed withdrawal before temperature raises could be tested since it improved feed consumption and egg production of laying hens exposed to 35°C (Sahin and Kucuk, 2001). In addition, a huge variability of responses was observed in sequential feeding: some birds fed with whole and ground corn showed similar egg production as control (results not shown). It would be interesting to better understand the biological mechanisms induced in sequential feeding by modelling the variability in laying performance according to nutrient supplies and temperature or sanitary challenge. As suggested by Traineau *et al.* (2014), environmental pressure as red mites pressure strongly impacted laying hens performance when they were fed sequentially with a cereal fraction and a protein-mineral fraction. Nutrients were supposed to be used in priority for growth and maintenance and only after for egg production in sequential feeding. Therefore, a dynamic model describing the changing priorities of hen as it ages, in response to environmental stress and different feeding systems could be a first step for answering this question (Martin and Sauvant, 2010).

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the students of the poultry centre of FCAV-UNESP Jaboticabal for their technical assistance as well as their full commitment in the data collection. The financial assistance of the following organizations is highly appreciated: “Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo” (FAPESP), Brazil; University François Rabelais, Tours, France and the CAPES-COFECUB project Sv687/10.

REFERENCES

- ALTMANN, J. (1974) Observational study of behavior: sampling methods. *Behaviour*, **49**: 227-267.
- BALNAVE, D. & BRAKE, J (2005) Nutrition and management of heat-stressed pullets and laying hens. *World Poultry Science Journal*, **61**: 399-406.
- BATONON, D. I., TRAINEAU, M., BOUVAREL, I., ROFFIDAL, L. & LESCOAT, P. (2014) Capacity of laying hens in sequential feeding to adjust their feed consumption when offered previously a nutritionally unbalanced diet. *European Poultry Science*, doi: 10.1399/eps.2014.37.
- CHOI, J. H., NAMKUNG, H. & PAIK I. K. (2004) Feed consumption pattern of laying hens in relation to time of oviposition. *Asian-australasian Journal of Animal Science*, **17**: 371-373

- DANIEL, M. & BALNAVE, D. (1981) Responses of laying hens to gradual and abrupt increases in ambient-temperature and humidity. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **21**: 189-195.
- DEZAT, E., UMAR FARUK, M., LESCOAT, P., ROFFIDAL, L., CHAGNEAU, A-M. & BOUVAREL, I. (2009) Réaction à court terme de poules pondeuses face à un mélange de blé et d'aliments de granulométrie différente. *Huitièmes Journées de la Recherche Avicole*, 25-26 mars 2009, St Malo, France.
- GABRIEL, I., MALLET, S. & LECONTE, M. (2003) Differences in the digestive tract characteristics of broiler chickens fed on complete pelleted diet or on whole wheat added to pelleted protein concentrate. *British Poultry Science*, **44**: 283-290.
- ISA (2011) Nutrition Management Guide, 2011 Edition. ISA Hendrix Genetics, Saint Brieuc, France.
- JORDAN, D., UMAR FARUK, M., LESCOAT, P., NABIL ALI, M., STUHEC, I., BESSEI, W. & LETERRIER, C. (2010) The influence of sequential feeding on behavior, feed intake and feather condition in laying hens. *Applied Animal Behavior Science*, **127**: 115-124.
- KESHAVARZ, K. (1998) Further investigations on the effect of dietary manipulation of protein, phosphorus, and calcium for reducing their daily requirement for laying hens. *Poultry Science*, **77**: 1333-1346.
- KESHAVARZ, K. (2003) Effects of reducing dietary protein, methionine, choline, folic acid, and vitamin B-12 during the late stages of the egg production cycle on performance and eggshell quality. *Poultry Science*, **82**: 1407-1414.
- KLEYN, R. (2013) Chicken nutrition: A guide for nutritionists and poultry professionals. ISBN: 978-1-899043-42-2, 347 pages, Context, England.
- LATSHAW, J. D. & MORITZ, J. S. (2009) The partitioning of metabolizable energy by broiler chickens. *Poultry Science*, **88**: 98-105.
- LIN, H., ZHANG, H. F., JIAO, H. C., ZHAO, T., SUI, S. J., GU, X. H., ZHANG, Z. Y., BUYSE, J. & DECUYPERE, E. (2005) Thermoregulation responses of broiler chickens to humidity at different ambient temperatures. I. One week of age. *Poultry Science*, **84**: 1166-1172.
- MARDSSEN, A. & MORRIS, T. R. (1987) Quantitative review of the effect of environmental temperature on food intake, egg output and energy balance in laying pullets. *British Poultry Science*, **28**: 693-704.
- MARTIN, O. & SAUVANT D. (2010) A teleonomic model describing performance (body, milk and intake) during growth and over repeated reproductive cycles throughout the lifespan of dairy cattle. 1. Trajectories of life function priorities and genetic scaling. *Animal*, **4**: 2030-2047.
- MASHALY, M. M., HENDRICKS III, G. L., KALAMA, M. A., GEHAD, A. E., PATTERSON, P. H & ABBAS, A. O. (2004) Effect of Heat Stress on Production Parameters and Immune Responses of Commercial Laying Hens. *Poultry Science*, **83**: 889-894.
- MELCION, J.-P. (2000) La granulométrie de l'aliment : principe, mesure et obtention. *INRA Productions Animales*, **13**: 81-97.
- MOGHADDAM, H. N., FARD, M. K., AGAH, M. J., HOSSEINI, S. J. & MIRAKZEHI, M. T. (2012) Effect of different levels of methionine, protein and tallow on the productive performance and egg

- quality of laying hens in the late-phase production. *Brazilian Journal of Poultry Science*, **14**: 149-158.
- MONGIN, P. & SAUVEUR, B. (1974) Voluntary food and calcium intake by the laying hens. *British Poultry Science*, **15**: 349-359.
- NIR, I., MELCION, J. P. & PICARD, M. (1990) Effect of particle-size of sorghum grains on feed-intake and performance of young broilers. *Poultry Science*, **69**: 2177-2184.
- OLVER, M. D. & JONKER, A. (1997) Effect of choice feeding on the performance of broilers. *British Poultry Science*, **38**: 571-576.
- OLVER, M. D. & MALAN, D. D. (2000) The effect of choice-feeding from 7 weeks of age on the production characteristics of laying hens. *South African Journal of Animal Science*, **30**: 110-114.
- PACHECO, W. J., STARK, C. R., FERKET, P. R. & BRAKE, J. (2013) Evaluation of soybean meal source and particle size on broiler performance, nutrient digestibility, and gizzard development. *Poultry Science*: 92:2914-2922.
- PÉREZ-BONILLA, A., NOVOA, S., GARCÍA, J., MOHITI-ASLI, M., FRIKHA, M. & MATEOS, G. G. (2012) Effects of energy concentration of the diet on productive performance and egg quality of brown egg-laying hens differing in initial body weight. *Poultry Science* **91**:3156-3166.
- PICARD, M., MELCION, J. P., BOUCHOT, C. & FAURE, J-M. (1997) Picorage et préhensibilité des particules alimentaires chez les volailles. *INRA Productions Animales*, **10**: 403-414.
- PORTELLA, F. J., CASTON, L. J. & LEESON, S. (1988) Apparent feed particle size preference by laying hens. *Canadian Journal of Animal Science*, **68**: 915-922.
- R CORE TEAM. (2013). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing.
- RENAUDEAU, D., COLLIN, A., YAHAV, S., DE BASILIO, V., GOURDINE, J. L. & COLLIER. R. J. (2012) Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. *Animal*, **6**: 707-728.
- ROSTAGNO, H. S., ALBINO, L. F., DONZELE, J. L., GOMES, P. C., DE OLIVEIRA, R. F., LOPES, D. C., FERREIRA, A. S., DE TOLEDO BARRETO, S. & EUCLIDES, R. F. (2011) Brazilian tables for poultry and swine: composition of feedstuffs and nutritional requirements. Translated by Becker, B. G., 3 ed., Viçosa, MG: UFV, DZO, 251p.
- SAHIN, K., & KUCUK, O. (2001) A simple way to reduce heat stress in laying hens as judged by egg laying, body weight gain and biochemical parameters. *Acta Veterinaria Hungarica*, **49**: 421-430
- SAMARA, M. H., ROBBINS, K. R. & SMITH, M. O. (1996) Interaction of feeding time and temperature and their relationship to performance of the broiler breeder hen. *Poultry Science*, **75**: 34-41.
- SIEGEL S. & CASTELLAN, N. J. (1988) Non parametric statistics for the behavioral sciences. MacGraw Hill Int., New York. pp 213-214.
- SINURAT, A. P. & BALNAVE, D. (1986) Free-choice feeding of broilers at high temperatures. *British Poultry Science*, **27**: 577-584.

- SYAFWAN, S., WERMINK, G. J. D., KWAKKEL, R. P. & VERSTEGEN, M. W. A. (2012) Dietary self-selection by broilers at normal and high temperature changes feed intake behavior, nutrient intake, and performance. *Poultry Science*, **91**: 537-549.
- TRAINEAU, M., BOUVAREL, I., MULSANT, C., ROFFIDAL, L., LAUNAY, C. & LESCOAT, P. (2013) Effects on performance of ground wheat and with or without insoluble fiber or whole wheat in sequential feeding for laying hens. *Poultry Science*, **92**: 2475-2486.
- TRAINEAU, M., BOUVAREL, I., MULSANT, C., ROFFIDAL, L., LAUNAY, C. & LESCOAT, P. (2014) Modulation of energy and protein supplies in sequential feeding in laying hens. *Animal*, in press.
- TRAVEL A, NYS, Y. & LOPES, E. (2010) Facteurs physiologiques et environnementaux influençant la production et la qualité de l'œuf. *INRA Productions Animales*, **23**: 155-166.
- UMAR FARUK, DEZAT, M., E., BOUVAREL, I., NYS, Y. & LESCOAT, P. (2008) Loose-mix and sequential feeding of mash diets with whole-wheat: effect on feed intake in laying hens. Proceedings of the XXIIIth World's Poultry Congress, Brisbane, Australia. p. 468.
- UMAR FARUK M., LESCOAT, P., BOUVAREL, I., NYS, Y. & TUKUR, H. M. (2010a) Use of whole millet (*Pennisetum glaucum*) and protein-mineral concentrate in poultry feeding is an efficient feed management method in Nigeria. XIII European Poultry Conference, 24-27 August 2010, Tours, France.
- UMAR FARUK M., BOUVAREL, I., MÊME, N., RIDEAU, N., ROFFIDAL, L., TUKUR, H. M., BASTIANELLI, D., NYS, Y. & LESCOAT, P. (2010b) Sequential feeding using whole wheat and a separate protein-mineral concentrate improved feed efficiency in laying hens. *Poultry Science*, **89**: 785-796.
- UMAR FARUK M., BOUVAREL, I., MÊME, N., ROFFIDAL, L., TUKUR, H. M., NYS, Y. & LESCOAT, P. (2010c) Adaptation of wheat and protein-mineral concentrate intakes by individual hens fed ad libitum in sequential or in loose-mix systems. *British Poultry Science*, **51**: 811-820.
- UMAR FARUK M., BOUVAREL, I., MALLET, S., ALI, M. N., TUKUR, H. M., NYS, Y. & LESCOAT, P. (2011) Is sequential feeding of whole wheat more efficient than ground wheat in laying hens? *Animal*, **5**: 230-238.
- USAYRAN N., FARRAN, M. T., AWADALLAH, H. H. O., AL-HAWI, I. R., ASMAR, R. J. & ASHKARIAN, V. M. (2001) Effects of added dietary fat and phosphorus on the performance and egg quality of laying hens subjected to a constant high environmental temperature. *Poultry Science*, **80**: 1695-1701.
- VERGARA, P., FERRANDO, C., JIMENEZ, M., FERNANDEZ, E. & GONALONS, E. (1989) Factors determining gastrointestinal transit-time of several markers in the domestic-fowl. *Quarterly Journal of Experimental Physiology*, **74**: 867-874.
- YO, T., SIEGEL, P. B., GUERIN, H. & PICARD, M. (1997) Self-selection of dietary protein and energy by broilers grown under a tropical climate: effect of feed particle size on the feed choice. *Poultry Science*, **76**: 1467-1473.

Publication 5 :

L'étude précédente a montré des performances faibles des poules nourries avec du maïs entier ou broyé distribué de façon séquentielle avec un aliment protéique-minéral. Ces faibles performances ont été reliées à une incapacité des poules à réguler correctement leur ingestion, entraînant une fragilité potentielle et des difficultés à résister à de fortes chaleurs. Il est donc apparu important d'évaluer l'effet de ce système d'alimentation en conditions de chaleur contrôlées. Ainsi, une étude a été réalisée avec comme objectifs de déterminer la capacité des poules pondeuses en alimentation séquentielle à ajuster leur consommation alimentaire après avoir été préalablement nourries avec un régime nutritionnellement déséquilibré dans des conditions environnementales contrastées.

Deux expérimentations⁶ ont été menées en parallèle dans deux ambiances différentes entre 20 et 30 semaines d'âge : une expérience (Exp. 1) en température ambiante standard (20°C) et une autre expérience (Exp. 2) où les animaux ont été exposés à une température continue à 26°C. La période expérimentale était répartie en 2 phases :

- une première phase (de 20 à 23 semaines d'âge) où 4 régimes ont été distribués dans l'Exp. 1 et 3 régimes dans l'Exp. 2. Un aliment complet témoin était distribué deux fois par jour avec un niveau constant d'énergie et de protéines dans les 2 expériences. Les poules alimentées de façon séquentielle recevaient la fraction riche en énergie (E) le matin et la fraction riche en protéines et calcium (P) l'après midi. Dans l'Exp. 1, trois régimes séquentiels ont été offerts : 40%E/60%P, 50%E/50%P, et 60%E/40%P. Les poules dans la cellule chaude (Exp. 2) ont reçu deux régimes en séquentiel (40% E/60% P; 50% E/50% P).
- Une seconde phase entre 24 et 30 semaines où nous avons testé les arrières-effets des régimes précédents en distribuant un même régime séquentiel aux poules en alimentation séquentielle (E50/P50) et le régime témoin pour celles qui en avaient.

Les résultats ont montré qu'en température neutre (Exp.1), les poules alimentées de façon séquentielle ont un indice de consommation amélioré comparativement à celui des poules

⁶ Cette étude a fait l'objet d'un article qui a été publié dans *European Poultry Science* (Batonon et al., 2014 *Europ. Poult. Sci.* 78.2014, 10.1399/eps.2014.37).

alimentées en continu. De la semaine 24 à 29, l'ensemble de poules en alimentation séquentielle a convergé vers un niveau d'ingestion équivalent indépendamment du régime reçu précédemment. Ainsi, le poids des poules et la composition corporelle ne diffèrent pas en alimentation séquentielle. Les poules en alimentation séquentielle soumises à des températures élevées (Exp. 2) ont eu tendance à moins consommer mais produisent de la même façon que les poules en alimentation continue. Par conséquent, il peut en être conclu que la température chaude diminue globalement les performances mais n'inhibe pas l'effet bénéfique de l'alimentation séquentielle.

Capacity of laying hens in sequential feeding to adjust their feed consumption when offered previously a nutritionally unbalanced diet

Vermögen von Legehennen, die zuvor mit einer unausgewogenen Ration gefüttert wurden, die Futteraufnahme bei sequentieller Fütterung optimal einzustellen

Dolores I. Batonon^{1,5*}, Maxime Traineau^{1,3*}, Isabelle Bouvarel², Lucien Roffidal³ and Philippe Lescoat^{1,4}

¹ INRA, UR83 Recherches Avicoles, F-37380 Nouzilly, France

² ITAVI, Nouzilly, France

³ INZO°, Montgermont, France

⁴ AgroParisTech, Département Sciences de la Vie et Santé – UFR Développement des Filières Animales, Paris, France

⁵ UAC-FSA, Laboratoire de Recherches Avicoles et de Zoo-Economie, Abomey-Calavi, Bénin

Correspondence: philippe.lescoat@agroparistech.fr

Manuscript received 20 November 2013, accepted 15 February 2014

Introduction

The characteristic of sequential feeding is the offering of two dietary components alternately at different times of the day. This technique was reported as more economical in countries, in which feedstuffs transport and diet mixing are expensive and where the direct use of locally produced feedstuffs could be implemented (UMAR FARUK, 2010). Distribution of a high energy diet in the morning followed by a protein-mineral concentrate in the afternoon resulted in a reduction in feed energy and protein intakes while maintaining egg production, egg weight compared to a complete diet given throughout the day (LEESON and SUMMERS, 1978; REICHMANN and CONNOR, 1979). LEE and OHH (2002) also reported a reduction in feed intake when birds were offered a high energy/protein and low Ca diet in the morning and a low energy/protein and high Ca in the afternoon.

However, this feeding system impacts birds' weight. Sequentially fed birds were lighter when compared with control fed ones (ROBINSON, 1985; UMAR FARUK et al., 2010a). Low weight could be linked to the lower feed intake, also related to the lower body fat deposition in sequential feeding (SCANES et al., 1987; UMAR FARUK et al., 2011). Since laying performances are assumed to depend on bird's maturity (BOUVAREL et al., 2010; CANET et al., 2012), the question arises whether hens with lower feed intake and lower body weight compared to complete diet are able to go ahead producing at an equivalent level of hens fed complete diet for the whole laying cycle.

Moreover, to the authors' knowledge, there is no specific research on the sensitivity of laying hens to unbalanced diet both in energy and protein under sequential feeding management provided at the beginning of the laying period. Most studies on sequential feeding indicate benefits when birds were offered sequential diets contrasted between morning and afternoon, but with a daily supply similar to the control diets (BLAIR et al., 1973; ROBINSON, 1985; UMAR FARUK et al., 2010a). However, KESHAVARZ (1998) indicated that egg production can't be maintained by providing an adequate level of good quality of protein (16%) only half a day, compared to the control group that received a diet with 16% protein the whole day. The flexibility of hens according to the provided nutrients has therefore to be studied. This might help to drive sequentially fed birds to a required shape needed to keep on performing correctly for the whole laying cycle.

Besides, the detrimental effects of high environmental temperature on poultry performance are commonly observed: decreasing egg production (ARIMA et al., 1976), egg mass (DEATON et al., 1986) and egg weight (BALNAVE and BRAKE, 2005). Increasing the dietary level of protein (GUNAWARDANA et al., 2008; ALMEIDA et al., 2012) or allowing bird to consume adequate nutrients before photo-stimulation has been suggested to overcome the negative effect of heat stress (BALNAVE and BRAKE, 2005). Sequential feeding, which maintains egg production in laying hens with a reduction of feed intake under high temperatures, might be a solution in this environment (UMAR FARUK, 2010).

However, lack of consistent references regarding sequential feeding under high environmental temperatures restrains the flexibility of this system. Consequently, further investigations are required on the ability of laying hens under sequential feeding to control their intakes and performances in contrasted environments.

Therefore, the present work was designed to investigate the direct impacts of sequential distribution of unbalanced diets in energy and protein contents on the performances of laying hens from 20 to 23 weeks-old. A second step was to evaluate the back-effects of 20 to 23 weeks-old unbalanced supplies on performances of laying hens offered balanced sequential feeding between 24 and 29 week-old. To explore contrasted environments, two trials were performed: the first with a neutral temperature and the second with a hot one.

Materials and Methods

Two different experiments were conducted simultaneously. In both trials, Hendrix Isa Brown laying hens were housed in a three-tier battery having individual cages (25 × 38 cm) equipped with a nipple drinker. The feeding through was common to 5 cages. Each group of 5 contiguous cages got the same diet. Birds were offered whole wheat in mixed diet or sequentially from weeks 16 to 18 to implement sequential feeding (UMAR FARUK et al., 2008).

The experimental period ran from week 19 to 30 of age. Photoperiod was 12L:12D at week 16, reached 16L:8D at week 18 and remained at this level until the end of the experiment.

Experimental treatments

Composition and calculated contents of nutrients of diets are described in Table 1. The control treatment containing 10.9 MJ/kg and 165 g CP/kg was fed *ad libitum* and was given in equal portions twice a day between 20 and 29 weeks-old. For the sequential combinations, birds received the high-energy fraction (E) in the morning and beginning of the afternoon and the high protein and mineral fraction (P) in the late afternoon and early morning. To test the birds' flexibility, contrasted sequential diets were provided. Energy fraction (E: 98 g CP/kg, 13.1 MJ/kg) and protein fraction (P: 232 g CP/kg, 8.8 MJ/kg) were offered in varying proportions: 50 g of E between 8:45 h and 14:45 h and 75 g P between 14:45 h and 8:45 h for the E40/P60 diet; 62.5 g of E between 8:45 h and 15:45 h and 62.5 g of P between 15:45 h and 8:45 h for the E50/P50 diet; 75 g of E between 8:45 h and 16:45 h and 50 g of P between 16:45 h and 8:45 h for E60/P40. Each bird was offered 125 g of feed i.e. 105% of the theoretical requirement of laying hens (ISA, 2011).

Table 1. Composition of experimental diets given to laying hens between 19 and 29 weeks-old

Zusammensetzung der Versuchsrationen für die Legehennen im Altersabschnitt 19. bis 29. Lebenswoche

Ingredient (g/kg)	Control diet	Energy fraction (E)	Protein fraction (P)
Corn	444.5	715.0	170.0
Wheat	160.0	–	125.0
Wholewheat	–	200.0	–
Soybeanmeal	200.0	–	399.0
Calcium carbonate	75.9	–	149.5
Sunflowermeal	78.0	69.0	87.0
Soybeanoil	16.0	16.0	17.0
Dicalcium phosphate	13.1	–	2.7
Premix ¹	10.0	–	20.0
DL-Methionine	1.6	–	3.4
L-Lysine	0.1	–	0.2
<i>Calculated composition (g/kg)</i>			
ME (MJ/kg) ²	10.9	13.1	8.8
CP	165.0	98.0	231.7
Analyzed CP (g/kg)	170.2	99.1	231.7
DM	886.5	871.9	901.4
Calcium	36.0	0.4	71.0
Fat	40.2	46.8	34.5
Total P	5.9	2.9	9.0
Available P	3.1	0.7	5.7
Lysine	8.2	3.2	13.2
Methionine	4.5	2.1	7.1
Threonine	6.6	3.6	9.4
Tryptophan	2.0	0.9	3.0

¹ Premix: Supplied per kg of diet at Vitamin A 750000 UI, Vitamin D3 300000 UI, Vitamin E (tocopherolacetate 3a700) 1000 UI, Vitamin K3 100 mg, Zinc 10000 mg, Manganese 10000 mg, Copper 1000 mg, Iron 4000 mg, Iode 150.0 mg, Selenium 30.0 mg; Canthaxanthin 1950.0 mg, β -apocarotenoidacid 2000.0 mg, lutein 3560.0 mg, zeaxanthin 200.0 mg, Cryptoxanthin 80.0 mg, Citricacid 400.00 mg, orthophosphoricacid 660.00 mg, Ethoxyquin 400 mg, Propyl gallate (E310) 400 mg.

² Nutritional values were calculated by INZO[®] adapted from SAUVANT et al., 2004

Since corn is richer in energy and lower in protein than wheat (SAUVANT et al., 2004), the energy fraction was formulated mostly with ground corn and a limited amount of 20% whole wheat to obtain large differences of nutrient supply dynamics between experimental diets. Inclusion of whole grains in the diet of laying hens was chosen to stimulate the digestive capacity of hens (NIR et al., 1990) by increasing the gizzard size. Hens with E40/P60 received 10.5 MJ ME/kg and 178 g CP/kg, hens with E50/P50 received 10.9 MJ ME/kg and 165 g CP/kg and those in E60/P40 group received 11.4 MJ ME/kg and 152 g CP/kg. Diets were formulated according to INRA tables (SAUVANT et al., 2004). Water was given *ad libitum* throughout the experimental period.

Experiment 1 (Exp. 1)

The objective of this experiment was to evaluate the impacts of unbalanced diets in energy and protein contents offered sequentially on the performances of laying hens from 20 to 23 weeks old in neutral environmental condition. Experimental design is described Table 2. One hundred and twenty birds were reared at $20.4^{\circ}\text{C} \pm 0.02$, kept constant from week 19 to week 30. Birds were divided into 4 groups of 30 birds (6 feeding troughs * 5 contiguous cages). Four different diets were provided in this experiment between 20 and 23 weeks: control diet and 3 sequential diets (40E/60P; 50E/50P; 60E/40P). To investigate the ability of laying hens receiving contrasted diets from 20 to 23 week-old, to converge on similar characteristics at 30 weeks of age, two diets were given between week 24 and 29: the control one to the birds receiving earlier the same diet and the 50E/50P to all other birds.

Table 2. Experimental design
Versuchsdesign

	Experiment 1	Experiment 2
Environmental condition	Neutral temperature	High temperature
Diets	Control E40/P60 E50/P50 E60/P40	Control E40/P60 E50/P50 –
Replicates (group of 5 hens)	6	4
Number of birds	30	20

A Control diet was fed ad libitum between 20 and 29 weeks-old. Between 20 and 23 weeks-old, 3 sequential diets were provided in the morning for E and in mid-afternoon for P: E40/P60: 50 g of the energy fraction (E) and 75 g of protein fraction (P); E50/P50: 62.5 g of E and 62.5 g of P; E60/P40: 75 g of E and 50 g of P. Between 24 and 29 weeks of age, birds previously with E40/P60, E50/P50 or E60/P40 were offered the same sequential diet, E50/P50.

Experiment 2 (Exp. 2)

A group of 60 hens was placed in a constantly hot temperature room ($25.8^{\circ}\text{C} \pm 0.02^{\circ}\text{C}$) to study the impacts of sequential distribution of unbalanced diets from 20 to 23 weeks on bird's response in this environment. As in the first experiment (Table 2), birds were divided into 3 groups of 20 birds (4 feeding troughs * 5 contiguous cages). They were habituated to this high temperature by a gradual increase to avoid acute heat stress (DANIEL and BALNAVE, 1981; EMERY et al., 1984). An excessive energy supply as provided by 60E/40P could dramatically decrease the overall feed intake and this diet was therefore omitted. Thus, control diet and 2 sequential diets (40E/60P; 50E/50P) were provided between 20 and 23 weeks. In the second period, birds got two diets: the control one and the 50E/50P, as in the first experiment.

Measurements

Feed intake was recorded weekly for each group of five cages. In the sequentially fed treatments, intakes of E and P were measured separately. Egg production was measured by recording the number of eggs produced daily. Egg weight was recorded four times a week. Weight of egg components (yolk, albumen, shell) was determined on a daily sample every 3 weeks, starting at week 21. Albumen and the chalazae were separated using forceps prior to weighing the yolk. Shells were washed and dried for 12 hours in a drying oven at 70°C and then weighed.

Birds were weighed individually at 16, 19, 23 and 30 weeks of age. Body composition was predicted with a noninvasive method based on Bioelectrical Impedance Analysis (BIA) at week 19, 23 and 30. The technique has been developed by the company INZO^{*}. It is assumed that the electrical impedance of the biological organism is indicative of the highly conductive fat-free component (BERG and MARCHELLO, 1994). The electrical impedance of a tissue depends on its fluid and electrolyte content (RUTTER et al., 1998) and therefore on their relative proportions of muscle, lipid, water and ash. Considering that, these proportions could consequently be predicted. This method allows monitoring the evolution of the body composition throughout the experimental period.

The weight of the digestive organs was recorded at the end of the trials to assess the effect of feeding system and temperature conditions. For both experiments, ten birds per treatment randomly selected were weighed before being injected with sodium Pentobarbital solution (1 ml/kg body weight). The abdominal cavity was opened, the digestive tract dissected and separated into gizzard, small intestine, pancreas, liver and spleen. Gizzard was placed into an iced container (-4°C) for 24 h to facilitate the removal of the surrounding fat before being emptied and weighed.

Statistical analysis

Data from each experiment were analyzed based on 2 periods: from 20 to 23 weeks of age and from 24 to 29 weeks of age, according to the changing of diets at 24 weeks of age. The experimental unit for feed consumption (feed intake, fractional intakes, ME and CP intakes) and feed conversion ratio was the group of 5 contiguous cages due to the common feeding trough. The analyses on the other variables were based on individual values from cages.

In Exp. 1, control diet was compared to all sequential diets; then, the effects between the three sequential diets (E40/P60 vs. E50/P50 vs. E60/P40) were tested. A one-way ANOVA was performed to test the treatment effect on all measured variables. Results were considered significantly different if $P < 0.05$, and a Bonferroni-Dunnett pairwise comparison was used to compare differences between means.

In hot environmental condition (Exp. 2), only the diet effect was tested (Control vs. E40/P60 vs. E50/P50). Due to the number of replications in this experiment, non-parametric tests were performed on feed consumption data and on feed conversion ratio. When there are only two groups (E and P fractions intake), a Mann-Whitney test was performed and Kruskal-Wallis test was realized for comparison of the 3 diets (total feed intake, ME, CP intake and FCR). Laying performances and digestive organs weights have been submitted to a one-way ANOVA. Similarly, results were considered significantly different if $P < 0.05$, and Bonferroni-Dunnett pairwise comparison was used to compare differences between means.

Body content was submitted to a one-way repeated measures ANOVA. Statistical analyses were performed using R version 2.15.2 (R CORE TEAM, 2012).

Results

Effect of the feeding systems in the neutral temperature condition (Exp. 1)

Weeks 20 to 23. From 20 to 23 weeks of age, no difference was observed with E40/P60, E50/P50 and E60/P40 compared to control diet for total feed, ME and CP intakes (Table 3). In sequential feeding, energy and protein contents did not affect the total feed intake. However, energy fraction (E) intake was significantly lower with E40/P60 diet compared to the two other sequential diets, representing respectively about 42%, 51% and 59% of the total feed intake. Regarding protein fraction (P) intake, the complementary results were observed. ME intake was similar among the treatments while CP intake was significantly affected by sequential diets. The pairwise comparison showed that E50/P50 protein intake tended to be different from the E60/P40 whereas both diets are significantly lower than the E40/P60. Egg production was increased with the sequential diets compared to the control one. Egg weight, egg mass and egg components proportions were similar between control and sequential diets except for the egg shell percentage. Feed conversion ratios (FCR) were higher with control group (2.20) compared to sequential ones (2.04). There was no difference in feed efficiency within the sequential diets.

Table 3. Effect of feeding systems between week 20 and 23 of life on performances of laying hens between 20 and 29 weeks-old in neutral temperature condition (Experiment 1)

Einfluss des Fütterungssystems zwischen der 20. und 23. Lebenswoche auf die Leistung der Legehennen im Altersabschnitt 20. bis 29. Lebenswoche unter neutralen Temperaturbedingungen (Versuch 1)

	Control diet ¹	E40/P60	E50/P50	E60/P40	SEM	Control vs. Sequential ²	E40/P60 vs. E50/P50 vs. E60/P40
<i>N</i> ³	(<i>N</i> = 6)	(<i>N</i> = 6)	(<i>N</i> = 6)	(<i>N</i> = 6)			
Total feed intake (g/b/d)							
Wk20–23	107	107	104	103	1.55	NS	NS
Wk24–29	119	117	115	115	1.60	< 0.10	NS
Energy fraction intake (g/b/d)							
Wk20–23		44.8 ^a	53.3 ^b	60.3 ^c	0.87		< 0.01
Wk24–29		56.6	55.6	55.3	1.30		NS
Protein fraction intake (g/b/d)							
Wk20–23		60.9 ^a	50.4 ^b	42.4 ^c	1.18		< 0.01
Wk24–29		59.8	59.5	59.9	0.41		NS
ME intake (MJ/b/d)							
Wk20–23	1.24	1.19	1.21	1.23	0.02	NS	NS
Wk24–29	1.38	1.35	1.33	1.33	0.02	< 0.10	NS
CP intake (g/b/d)							
Wk20–23	18.4	19.4 ^a	17.7 ^B	16.4 ^C	0.29	NS	< 0.01
Wk24–29	20.5	20.3	20.1	20.2	0.22	NS	NS
Feed conversion ratio							
Wk20–23	2.20	2.02	2.09	1.99	0.06	< 0.05	NS
Wk24–29	2.05	1.98	1.91	1.90	0.05	NS	NS
<i>N</i> ⁴	(<i>N</i> = 30)	(<i>N</i> = 30)	(<i>N</i> = 30)	(<i>N</i> = 29)			
Egg production (%)							
Wk20–23	82.0	91.2	88.7	93.0	2.92	< 0.05	NS
Wk24–29	92.4	97.7	96.6	98.8	1.48	< 0.05	NS
Egg weight (g)							
Wk20–23	56.9	56.8	55.9	55.1	0.67	NS	NS
Wk24–29	62.6	61.7	62.3	61.3	0.89	NS	NS
Egg mass (g/b/d)							
Wk20–23	48.6	52.0	49.7	51.2	1.75	NS	NS
Wk24–29	58.9	59.1	60.2	60.6	1.54	NS	NS
Egg yolk (%)							
Wk20–23	21.6	21.7	21.4	22.0	0.32	NS	NS
Wk24–29	23.7	23.8	23.6	23.9	0.34	NS	NS
Egg albumen (%)							
Wk20–23	68.0	68.0	68.7	68.0	0.40	NS	NS
Wk24–29	66.1	65.8	65.9	65.5	0.38	NS	NS
Egg shell (%)							
Wk20–23	10.44	10.30 ^B	9.82 ^C	9.96 ^{BC}	0.15	< 0.05	< 0.10
Wk24–29	10.13	10.42	10.40	10.62	0.12	< 0.05	NS
Body weight (g)							
Wk 19	1571	1569	1579	1610	22.23	NS	NS
Wk 23	1736	1644	1624	1646	24.50	< 0.01	NS
Wk 30	1813	1669	1650	1658	25.53	< 0.01	NS

¹ A Control diet was fed ad libitum between 20 and 29 weeks-old. Between 20 and 23 weeks-old, 3 sequential diets were provided in the morning for E and in mid-afternoon for P: E40/P60: 50 g of the energy fraction (E) and 75 g of protein fraction (P); E50/P50: 62.5 g of E and 62.5 g of P; E60/P40: 75 g of E and 50 g of P. Between 24 and 29 weeks of age, birds previously with E40/P60, E50/P50 or E60/P40 were offered the same sequential diet, E50/P50.

² Probability mentioned matches the effect of control diet vs. all sequential diets.

³ The experimental unit for the feed ad nutrient consumption and feed conversion ratio was the group of 5 contiguous cages (*N* = 6) due to the common feeding trough.

⁴ The analysis was based on individual values from cages. One bird's mortality was recorded in the E60/P40 diet.

^{a,b,c}: values within the same row not sharing a common superscript letter differ significantly at $P < 0.05$. ^{A,B,C}: have a trend at $P < 0.10$, not significantly at $P > 0.10$.

Weeks 24 – 29. From weeks 24 to 29, total feed intake tended to be higher for the control than for the sequential diets ($P < 0.10$) with no difference between sequential diets (Table 3). All sequentially fed hens ate a similar quantity of E (around 48% of total feed intake) and P (around 52% of total feed intake). Layers with control diet tended to eat more ME than hens with sequential diets ($P < 0.10$) whereas CP intake was similar among all treatments. As previously observed, egg production was significantly increased with the three sequential groups compared to the control one. Egg weight, egg mass, egg yolk and albumen proportion did not present any difference among all diets. Egg shell percentage was found to be lower in the control compared to the 3 sequential groups. FCR were similar between the four groups from weeks 24 to 29 of age.

Body weights were similar at week 19 for all diets and they increased with age. Hens fed sequentially were always significantly lighter than control fed ones. The average body weight values were 1736 g for hens with control diet and 1638 g for hens with sequential diets at week 23. At week 30, they were 1813 g and 1659 g, respectively, for the control and the sequential ones.

At 30 weeks-of-age, pancreas, liver and spleen proportions were not influenced by the feeding system (Table 5). Nevertheless, sequential feeding resulted in significantly heavier gizzard relative to control diet. No difference in the proportion of small intestine was recorded between all treatments except for E40/P60 diet, which tended to be higher than E50/P50. The heaviest abdominal fat proportion was obtained with control group, whereas the lowest was obtained with E40/P60. Figures 1a and 1b show the time change in fat and protein contents according to diets from 19 to 30 weeks of age. There was a significant increase in fat level in all treatments with age, although hens fed sequentially had significantly lower fat content. Birds in sequential feeding had similar fat content. Hens fed with sequential diets were significantly higher than the control ones regarding protein proportion while no difference was observed within sequential diets.

Table 5. Effects of feeding systems between week 20 and 23 of life on weight of digestive organs and abdominal fat at 30 weeks of age (experiments 1 and 2)

Einfluss des Fütterungssystems zwischen der 20. und 23. Lebenswoche auf das Gewicht der Verdauungsorgane und das Abdominalfett in der 30. Lebenswoche (Versuche 1 und 2)

% BW		Gizzard	Small intestine	Pancreas	Liver	Spleen	Abdominal fat
Experiment 1							
Control diet	$N = 10$	1.45	1.95	0.19	2.91	0.085	2.7
E40/P60	$N = 10$	1.66	2.15 ^{AB}	0.20	2.81	0.084	1.4
E50/P50	$N = 10$	1.63	1.95 ^A	0.20	2.89	0.093	1.4
E60/P40	$N = 10$	1.63	2.18 ^B	0.21	2.79	0.091	1.9
Control vs. Sequential*		< 0.01	NS	NS	NS	NS	< 0.01
E40/P60 vs. E50/P50 vs. E60/P40		NS	< 0.10	NS	NS	NS	NS
Experiment 2							
Control diet	$N = 10$	1.45	1.70 ^a	0.19 ^A	2.68	0.100	3.1 ^a
E40/P60	$N = 10$	1.67	1.89 ^b	0.20 ^{AB}	2.80	0.077	1.3 ^b
E50/P50	$N = 10$	1.55	1.88 ^{ab}	0.2 ^B	2.82	0.103	1.7 ^b
SEM		0.07	0.06	0.006	0.11	0.007	0.28
Control vs. E40/P60 vs. E50/P50		NS	< 0.05	< 0.10	NS	< 0.10	< 0.01

A Control diet was fed ad libitum between 20 and 29 weeks-old. Between 20 and 23 weeks-old, 3 sequential diets were provided in the morning for E and in mid-afternoon for P: E40/P60: 50 g of the energy fraction (E) and 75 g of protein fraction (P); E50/P50: 62.5 g of (E) and 62.5 g of (P); E60/P40: 75 g of (E) and 50 g of (P). Between 24 and 29 weeks of age, birds previously with E40/P60, E50/P50 or E60/P40 were offered the same sequential diet: E50/P50.

* Probability mentioned matches the effect of control diet vs. all sequential diets.

^{a,b,c}: values within the same column not sharing a common letter differ significantly at $P < 0.05$; NS, not significantly at $P > 0.10$. ^{A,B,C}: significantly at $P < 0.10$.

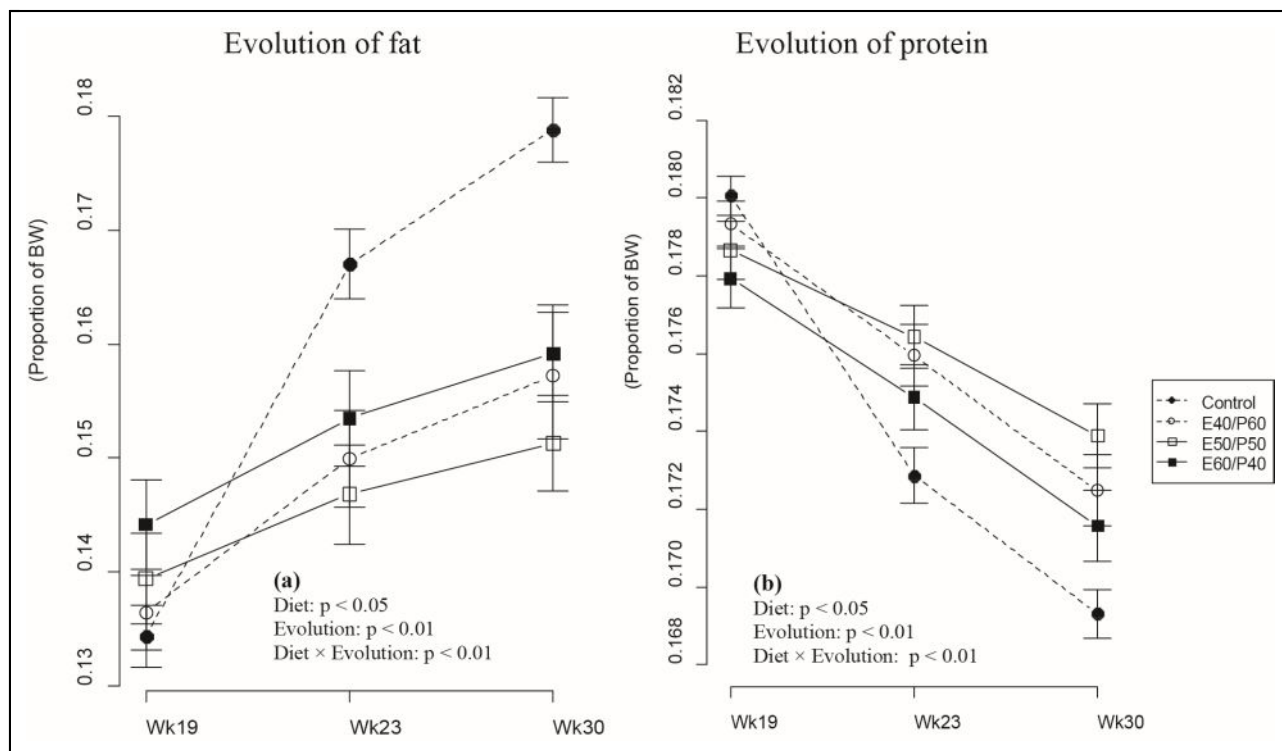


Figure 1. Effects of feeding systems between week 20 and 23 of life on estimated body composition (protein proportion and fat proportion) at 19, 23 and 30 weeks-old for laying hens fed between 19 and 30 weeks of age with control or a sequential combination of energy and protein fractions (Exp. 1)

Einfluss des Fütterungssystems zwischen der 20. und 23. Lebenswoche auf die geschätzte Körperzusammensetzung (Protein- und Fettanteil) von Legehennen, die zwischen der 19. und 30. Lebenswoche mit einem Kontrollfutterregime oder einer sequentiellen Kombination von Energie- und Proteinfractionen gefüttert wurden, in der 19., 23. und 30. Lebenswoche (Versuch 1)

Hens in sequential groups got similar performances at 23 weeks old but they were significantly different from the control group regarding feed efficiency. The results obtained from 24 to 29 weeks-of-age indicated that birds with different feed consumption at 23 week-old converged to the same level of intake when they were given access to the same diet. Laying performances and body content did not vary within the sequential group with the change of diets.

Effect of feeding systems on laying hens performances under high temperature (Exp. 2)

Weeks 20 to 23. Total feed intake during the distribution of unbalanced diets (Table 4) tended to be affected by feeding system: it tended to be lower for E40/P60 than the control while E40/P60 was similar to E50/P50. Birds fed E50/P50 diet consumed more E (around 47% of total feed intake) than birds in E40/P60 (around 41% of total feed intake) whereas no difference was observed for P intake. ME intake was significantly reduced with E40/P60 diet compared to E50/P50 and Control while CP intake was similar among treatments.

Table 4. Effect of feeding systems between week 20 and 23 of life on performances of laying hens between 20 and 29 weeks-old under hot condition (Experiment 2)

Einfluss des Fütterungssystems zwischen der 20. und 23. Lebenswoche auf die Leistung der Legehennen im Altersabschnitt 20. bis 29. Lebenswoche unter heißen Temperaturbedingungen (Versuch 2)

	Control diet ¹	E40/P60	E50/P50	SEM	Control vs. E40/P60 vs. E50/P50
<i>N</i> ²	(<i>N</i> = 4)	(<i>N</i> = 4)	(<i>N</i> = 4)		
Total feed intake (g/b/d)					
Wk20–23	104	96.8	98.8	1.92	< 0.10
Wk24–29	112	107	109	1.62	NS
Energy fraction intake (g/b/d)					
Wk20–23		39.7	46.6	0.93	< 0.01
Wk24–29		48.2	49.4	0.81	NS
Protein fraction intake (g/b/d)					
Wk20–23		57.0	52.1	1.47	NS
Wk24–29		57.1	59.2	0.69	< 0.05
ME intake (MJ/b/d)					
Wk20–23	1.20 ^a	1.09 ^b	1.14 ^{ab}	0.02	< 0.05
Wk24–29	1.19	1.12	1.20	0.07	NS
CP intake (g/b/d)					
Wk20–23	17.9	17.9	17.4	0.37	NS
Wk24–29	17.7	17.6	18.8	1.01	NS
Feed conversion ratio					
Wk20–23	1.95	1.82	1.87	0.07	NS
Wk24–29	1.94	1.93	1.90	0.06	NS
<i>N</i> ³	(<i>N</i> = 20)	(<i>N</i> = 20)	(<i>N</i> = 20)		
Egg production (%)					
Wk20–23	96.4	94.5	96.1	2.13	NS
Wk24–29	95.1	92.4	96.3	1.27	NS
Egg weight (g)					
Wk20–23	56.3	55.6	54.7	0.85	NS
Wk24–29	61.3	60.3	59.3	0.87	NS
Egg mass (g/b/d)					
Wk20–23	54.4	52.7	52.8	1.61	NS
Wk24–29	58.3	55.8	57.2	1.32	NS
Egg yolk (%)					
Wk20–23	21.9	21.6	21.0	0.31	NS
Wk24–29	23.4	22.7	22.6	0.34	NS
Egg albumen (%)					
Wk20–23	68.2 ^a	68.7 ^{ab}	69.4 ^b	0.34	< 0.05
Wk24–29	66.8	67.3	67.0	0.37	NS
Egg shell (%)					
Wk20–23	9.9	9.7	9.6	0.17	NS
Wk24–29	9.8 ^A	10.1 ^{AB}	10.3 ^B	0.14	< 0.10
Body weight (g)					
Wk 19	1565	1575	1590	22.19	NS
Wk 23	1652 ^a	1550 ^b	1577 ^{ab}	25.78	< 0.05
Wk 30	1701 ^a	1571 ^b	1624 ^{ab}	28.89	< 0.01

¹ A Control diet was fed ad libitum between 20 and 29 weeks-old. Between 20 and 23 weeks-old, 3 sequential diets were provided in the morning for E and in mid-afternoon for P: E40/P60: 50 g of the energy fraction (E) and 75 g of protein fraction (P); E50/P50: 62.5 g of (E) and 62.5 g of (P); E60/P40: 75 g of (E) and 50 g of (P). Between 24 and 29 weeks of age, birds previously with E40/P60, E50/P50 or E60/P40 were offered the same sequential diet: E50/P50.

² The experimental unit for the feed consumption and feed conversion ratio was the group of 5 contiguous cages (*N* = 4) due to the common feed trough.

³ Analysis was based on individual values from cages.

^{a,b,c}: values within the same row not sharing a common superscript letter differ significantly at *P* < 0.05. ^{A,B,C}: have a trend at *P* < 0.10, not significantly at *P* > 0.10.

Besides, there was no effect of the feeding systems on FCR and laying performances. The only meaningful difference in terms of egg components weights was observed with egg albumen proportion, significantly lower in control diet compared to the two sequential ones.

Hens have a similar body weight at week 19 which increased with age. Sequential feeding reduced body weight, the lower value was recorded for E40/P60 diet at week 23.

Weeks 24 to 29. Feeding systems did not affect total feed intake, E fraction intake, ME and CP intake, from weeks 24 to 29 (Table 4). The only difference was observed for P fraction intake with the highest consumption in E50/P50 compared to E40/P60. Moreover, there is no diet effect on laying performances. Egg weight and egg mass increased with age and there was no difference between control and sequentially fed birds. Egg albumen tended to be different according to the diet effect at $P < 0.10$ while no difference was found for egg yolk and egg shell proportions. Birds had similar feed conversion ratio: 1.94, 1.93 and 1.90 respectively for the control, E40/P60 and E50/P50 diets. Body weight increased with age and hens in E40/P60 group were lighter than those in control diet at week 30.

No significant difference was observed in gizzard weight between all diets (Table 5). However, hens fed with control diet have a lighter small intestine than those fed E40/P60. Pancreas weight tended to be lower for hens with control diet compared to E50/P50 diet, whereas, spleen weight tended to be lower for E40/P60 than for the others two diets ($P < 0.10$). The heaviest abdominal fat weight was obtained with Control.

Figures 2a and 2b show a change in fat and protein contents from 19 to 30 weeks of age. There was a significant increase in fat level in all treatments with time with no difference between diets. As previously observed, protein contents decreased with age but they were similar between sequential diets and control.

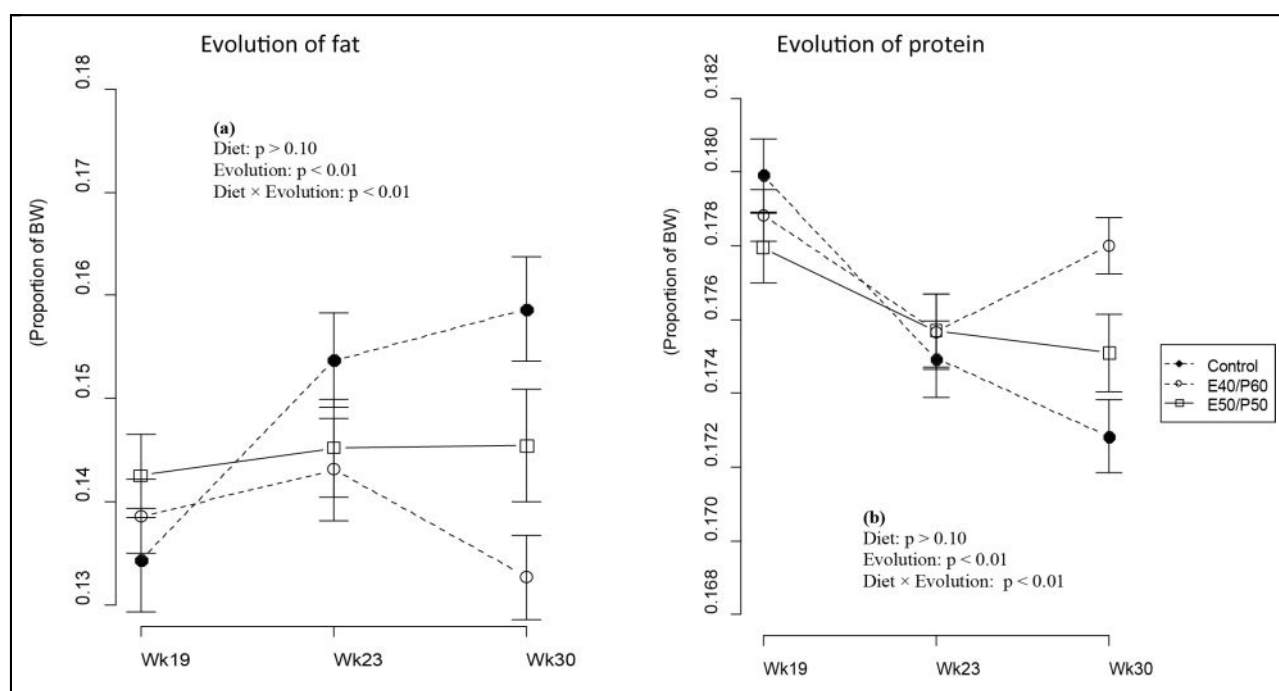


Figure 2. Effects of feeding systems between week 20 and 23 of life on estimated body composition (protein proportion and fat proportion) at 19, 23 and 30 weeks-old for laying hens fed with control or a sequential combination of energy and protein fractions between 19 and 30 weeks of age under high temperature (Exp. 2)

Einfluss des Fütterungssystems zwischen der 20. und 23. Lebenswoche auf die geschätzte Körperzusammensetzung (Protein- und Fettanteil) von Legehennen, die zwischen der 19. und 30. Lebenswoche mit einem Kontrollfutterregime oder einer sequentiellen Kombination von Energie- und Proteinfractionen gefüttert wurden, in der 19., 23. und 30. Lebenswoche unter hohen Umgebungstemperaturen (Versuch 2)

It was pointed out through the results obtained during 20 and 23 weeks-of-age that laying hens subjected to high temperature tended to eat less and produced as well as the control. When hens were offered the same diet in sequential feeding from 24 to 29 weeks, they converged to the same feeding characteristics at week 30.

Discussion

Effect of the feeding systems in the neutral temperature room (Exp. 1)

The chosen unbalance between energy and protein within each fraction and the sequential supply should help to monitor body weight and composition at 30 weeks of age. Regarding feed intake, the aim was reached since hens in sequential feeding had a daily morning fraction offer that drove the expected 40%, 50% and 60% intakes of the daily supply in the first period. Distribution of high-energy fraction followed by a protein-mineral one has improved feed efficiency for sequential diets compared to the control one in the first period. This improvement might be due to a slight under-consumption of feed and a higher egg production for sequentially fed hens compared to control ones as observed previously (UMAR FARUK et al., 2010a, b, 2011; TRAINEAU et al., 2013). This efficiency may also result of a more efficient digestion thanks to the fractional distribution (CHAGNEAU et al., 2009).

Besides, during the unbalanced period, similar ME and CP intakes were observed comparing control to sequential diets, suggesting a regulation of these nutrients by sequentially fed birds, consistently with BLAIR et al. (1973), MACISAAC and ANDERSON (2007) and UMAR FARUK et al. (2010b). Hens could fit their feed intake to satisfy their energy requirements; then, an increase in energy concentration leading to a reduced feed intake (PEREZ-BONILLA et al., 2012) while increasing dietary protein could increase (GUNAWARDANA et al., 2008) or have no effect (SUMMERS and LEESON, 1994; MOHITI-ASLI et al., 2012) on feed intake. In the second period, all hens were offered 50% E and 50% P. ME intake tended to be lower for sequential diets compared to the control one. Moreover, hens in sequential feeding were thinner and had lower abdominal fat weight than those in control continuous diet. As demonstrated by SMITH (1973), higher energy consumption than it is required for maintenance and production led to fat deposition, increasing the body weight as observed here with the difference in body weight and fat content between sequential and control fed birds.

Focusing on sequential diets, differences in CP intake could be observed in the unbalanced period while no difference in ME intake was observed. Two hypotheses could be proposed. First of all, the composition of the offered diets (BOUVAREL et al., 2004) leading to contrasted nutrient intake: the gap between E offered in the morning and P distributed in the afternoon is more pronounced in crude protein (98.0 g/kg for E vs. 231.7 g/kg for P; 59% of difference) than in metabolizable energy (13.1 MJ/kg for E vs. 8.8 MJ/kg for P; 37.3% of difference). With the same amount of feed, energy and protein unbalance are not symmetrical which could induce a lack in other nutrients such as amino acids. Regarding two limiting amino acids, methionine and lysine (NOVAK et al., 2004; MOGHADDAM et al., 2012), hens in sequential diets did not present any differences in total lysine and methionine intakes compared to the control diet but within the sequential group, there was a difference ($P < 0.01$) in these intakes. As demonstrated by HARMS and RUSSELL (1998), KESHAVARZ (2003) and MOGHADDAM et al. (2012), simultaneous reduction of dietary protein, methionine and lysine could reduce laying performances. Consistently, increasing methionine level significantly increased laying performances (SAKI et al., 2012) up to an asymptotic level between 0.36 – 0.38% (BOUVAREL et al., 2010). It seems therefore that hens are notable to finely tune their feed intake on the proportion of protein in the diet as observed by MOHITI-ASLI et al. (2012) but they are able to adapt their feed intake to the energy in the diet, even though deviations could be observed (BOUVAREL et al., 2010).

Effect of feeding systems and high temperature on laying hens performances (Exp. 2)

The aim of this experiment was to determine if high environmental temperature was affecting birds' performances offered sequential diets. Birds sequentially fed met the expected consumptions of E and P with the same hierarchy. This feed intake behavior could be explained by the reduction in appetite when the temperature is above 21°C (SMITH, 1973; MASHALY et al., 2004). Indeed, at high temperature, bird regulates its heat production by decreasing global feed intake or specific nutrient yielding heat during processing (SYAFWAN et al., 2012) which is consistent with our data of a lower E intake for sequentially fed birds compared to the control diet. Furthermore, the ingestion of excess carbohydrate produces a heat increment equivalent to 10–15% of the metabolizable energy while fat may produce 0 – 5% (KLEYN, 2013). Since E is higher in calculated fat content than P (46.8 g/kg vs. 34.5 g/kg, respectively), this might also contribute to explain the lower E intake under high temperature. Thus, UMAR FARUK et al. (2010a) hypothesized that the reduced total feed intake in sequential feeding under hot climate, combined with similar performance to conventional feeding, could lead to an improved feed utilization. Moreover, FCR in sequential diets were lower during the first period than in the second one while, according to the rearing guidelines, FCR decreased with age and temperature (PEGURI and COON, 1991) and is higher at the onset as observed in neutral temperature.

Our results stressed that there was a reduction in body weight and body weight gain due to treatments: birds fed sequentially had lower body weight compared to conventional feeding as observed in neutral temperature room (SMITH, 1973; UMAR FARUK et al., 2010a). Moreover, as it was hypothesized in neutral temperature condition, sequentially fed birds seem to have a lower fat deposition according to lower maintenance requirements (UMAR FARUK et al., 2010a). This metabolic mechanism might be similar in high temperature room since their energy requirements for maintenance decreased with temperature (DAGHIR, 2008). According to PEGURI and COON (1991) and CHENG et al. (1997), hot ambient temperatures lead to a decreased growth performance of birds due to a restriction in nutrients intakes and physiological changes observed in hot environment (CHENG et al., 1997; MUJAHID, 2011).

Conclusions

These studies indicate that laying hens in sequential feeding were able to modify their feed intake when diets varied in energy and protein contents. However, they highlighted the difficulty to increase robustness of animals by controlling weight gain. It would be interesting in future work to successfully control the performances of sequentially fed birds throughout the laying period according to their growth performances.

Moreover, these works suggest that high environmental temperature does not disable sequential feeding benefits. Previous studies have shown that hens supplied with sequential diet, could be more fragile, which was here observed through a decrease of performances with temperature. It must therefore be ensured, that hens fed sequentially, under high temperatures, will not be too thin or deficient in specific nutrient, in order to last a complete commercial laying period. There is however the need to investigate laying hens' responses to amino acids imbalance. Indeed, during the first period, temperature did not affect lysine and methionine intakes while there was a feeding system effect according to the diets offered. During the second period, there was a reduction in these two limiting amino acids intakes, suggesting that the length of exposure to heat may affect the response of birds as observed for protein (GONZALEZ-ESQUERRA and LEESON, 2005). Exposure to high temperature has been shown to influence amino acids digestibility (WALLIS and BALNAVE, 1984; BRAKE, 1998; MUJAHID, 2011). Attention should be given to an imbalance that was potentially induced by sequential feeding of diets varying both in energy and protein content.

Acknowledgments

We thank Philippe Didier and Michel Couty (INRA) for their technical assistance. We are grateful to our experimental unit (UE PEAT) for its help in the set-up of the experiment. The scientific and financial support of INZO (Montgermont, France) and the financial help of the French Embassy in Benin are highly appreciated.

Summary

Sequential feeding consists in splitting the diet into two fractions. Distribution of a high-energy diet in the morning followed by a diet rich in protein and calcium in the afternoon, can significantly improve feed efficiency. Nevertheless, previous works showed the difficulty of hens to regulate their feed intake and to overcome high temperatures when fed sequentially. Two experiments have been conducted to understand whether, controlling laying hens' feed consumption in sequential feeding system, would drive them to an optimal body weight and body composition. Feed consumption and performances of birds offered sequential diets unbalanced in energy and protein contents were investigated under two contrasted temperatures from 20 to 30 weeks of age. A complete diet was fed as control and given in equal portions twice a day. Birds in sequential diets received the high-energy fraction (E) in the morning and beginning of the afternoon and the high protein and mineral fraction (P) in the late afternoon and early morning.

Four different diets were provided between 20 and 23 weeks old for birds in experiment 1 (Exp. 1): control diet and 3 sequential diets (40% E/60% P; 50% E/50% P; 60% E/40%P). For birds in high temperature condition in the experiment 2 (Exp. 2), 3 diets were given: control diet, 2 sequential diets (40% E/60% P; 50% E/50% P). To test the flexibility of birds to converge to the same characteristics at week 30, birds in control group received the same diet and all other birds, the 50% E/50% P one from 24 to 29 weeks.

The results showed that under neutral temperature (Exp. 1), hens in sequential groups were different to the control one between 20 to 23 weeks, regarding feed efficiency. From 24 to 29 weeks, birds with different feed supply at 23

week converged to the same consumption. Laying performances and body composition did not vary in the sequential groups with the change of diets. Since birds fed sequentially in experiment 2 (Exp. 2) tended to consume less and produced as well as control fed birds, it might be concluded that high environmental condition reduced bird's performances but did not hide the effects of sequential feeding system.

Key words

Laying hens, sequential feeding, unbalanced diets, temperature, feed intake, performance

Zusammenfassung

Vermögen von Legehennen, die zuvor mit einer unausgewogenen Ration gefüttert wurden, die Futteraufnahme bei sequentieller Fütterung optimal einzustellen

Bei der sequentiellen Fütterung wird die Tagesration in zwei unterschiedlichen Fraktionen gefüttert. So, wird z.B. vormittags eine Ration mit hohem Energiegehalt und nachmittags eine Protein- und Kalzium-reiche Ration angeboten. Es hat sich gezeigt, dass hierdurch die Futterverwertung signifikant verbessert werden kann. Allerdings wurde in früheren Versuchen festgestellt, dass die Hennen bei hohen Umgebungstemperaturen Probleme haben, ihre Futteraufnahme richtig zu steuern. Das Ziel der zwei durchgeführten Versuche war daher, zu prüfen, ob über eine Kontrolle der Futteraufnahme bei der sequentiellen Fütterung eine Optimierung des Körpergewichts und der Körperzusammensetzung erreicht werden kann. Hierzu wurden die Futteraufnahme und die Leistung von Legehennen, die im Alter von 20 bis 30 Lebenswochen bei zwei sehr unterschiedlichen Umgebungstemperaturen gehalten wurden und in dieser Zeit zwei im Hinblick auf den Energie- und Proteingehalt unbalanzierte Rationen erhielten, erfasst. In der Kontrollgruppe wurden die Hennen zweimal am Tag mit einer vollständigen Futterration gefüttert. Die Hennen der Behandlungsgruppe erhielten die Energie-reiche Ration E am Morgen und am frühen Nachmittag, während die Protein-reiche Ration (P) am späten Nachmittag und am frühen Morgen angeboten wurden. Im ersten Versuchsdurchgang wurden vier Versuchsrationen zwischen der 20. und 23. Lebenswoche gefüttert: Kontrolle und 3 sequentielle Rationen (40% E/60% P; 50% E/50% P; 60% E/40% P). Im zweiten Versuchsdurchgang mit erhöhter Umgebungstemperatur kamen drei Rationen zum Einsatz: Kontrolle und 2 sequentielle Rationen (40% E/60% P; 50% E/50% P). Die Flexibilität der Hennen wurde getestet, indem die Hennen nach der Testphase (20.-23. Lebenswoche) bis zur 29. Lebenswoche mit einer 50% E/50% P-Ration gefüttert wurden. Die Leistungsparameter wurden dann in der 30. LW ermittelt.

Unter normalen Temperaturbedingungen (Versuch 1) unterschied sich die Futterverwertung der sequentiell gefütterten Hennen zwischen der 20. und 23. Lebenswoche von der der Kontrollgruppe. Zwischen der 24. und 29. Lebenswoche näherte sich die Futteraufnahme der vorher sequentiell gefütterten Hennen an die der Kontrolle an. Die Legeleistung und die Körperzusammensetzung der sequentiell gefütterten Hennen veränderte sich mit dem Wechsel der Rationen nicht. Nachdem die sequentiell gefütterten Hennen in Versuch 2 ähnliche Leistungen bei tendenziell geringerer Futteraufnahme erreichten wie die Kontrolltiere, kann daraus der Schluss gezogen werden, dass hohe Umgebungstemperaturen zwar zu einer Leistungsreduzierung führen, aber die Effekte der sequentiellen Fütterung sichtbar bleiben.

Stichworte

Legehennen, sequentielle Fütterung, unausgewogene Ration, Temperatur, Futteraufnahme, Leistung

References

- ALMEIDA, V.R., A.N. DIAS, C.F.D. BUENO, F.A.P. COUTO, P.A. RODRIGUES, W.C.L. NOGUEIRA, D.E. FARIA FILHO, 2012: Crude protein and metabolizable energy levels for layers reared in hot climates. Braz. J. Poult. Sci. **14**, 203-208.
- ARIMA, Y., F.B. MATHER, M.M. AHMAD, 1976: Response of egg-production and shell quality to increases in environmental-temperature in 2 age-groups of hens. Poult. Sci. **55**, 818-820.
- BALNAVE, D., J. BRAKE, 2005: Nutrition and management of heat-stressed pullets and laying hens. World's Poult. Sci. J. **61**, 399-406.

- BERG, E.P., M.J. MARCHELLO, 1994: Bioelectrical-Impedance analysis for the prediction of fat-free mass in lambs and lamb carcasses. *J. of Anim. Sci.* **72**, 322-329.
- BLAIR, R., W.A. DEWAR, J.N. DOWNIE, 1973: Egg production responses of hens given a complete mash or unground grain together with concentrate pellets. *Br. Poult. Sci.* **14**, 373-377.
- BOUVAREL, I., B. BARRIER-GUILLOT, P. LARROUDE, B. BOUTTEN, C. LETERRIER, F. MERLET, M. VILARINO, L. ROFFIDAL, S. TESSERAUD, J. CASTAING, M. PICARD, 2004: Sequential feeding programs for broiler chickens: Twenty-four- and forty-eight-hour cycles. *Poult. Sci.* **83**, 49-60.
- BOUVAREL, I., Y. NYS, M. PANHELEUX, P. LESCOAT, 2010: How hen's diet influences egg quality? *INRA Prod. Anim.* **23** (2), 167-182.
- BRAKE, J., 1998: Optimum dietary arginine: Lysine ratio for broiler chickens is altered during heat stress in association with changes in intestinal uptake and dietary sodium chloride. *Br. Poult. Sci.* **39**(5), 639-647.
- CANET, Z.E., B.M. ROMERA, V. FAIN BINDA, A. TERZAGHI, A.M. DOTTAVIO, R.J.D. MASSO, 2012: Productive indicators at sexual maturity in experimental populations of free range layers. *Rev. Argent. Prod. Anim.* **32**, 37-46.
- CHAGNEAU, A.M., S. LECUELLE, P. LESCOAT, M. QUENTIN, J.M. GUILLAUMIN, I. BOUVAREL, 2009: The slow growing chicken well add value food distribution by meal. 8^{èmes} Journées de la recherche avicole, St Malo, France, 25-26 March 2009, p. 59.
- CHENG, T.K., M.L. HAMRE, C.N. COON, 1997: Effect of environmental temperature, dietary protein, and energy levels on broiler performance. *J. Appl. Poult. Res.* **6**, 1-17.
- DAGHIR, N.J., 2008: Nutrient requirements of poultry at high temperatures, in: N.J. DAGHIR (Eds) *Poultry production in hot climates*, 2nd ed, pp. 132-159 (UK, Cromwell Press).
- DANIEL, M., D. BALNAVE, 1981: Responses of laying hens to gradual and abrupt increases in ambient-temperature and humidity. *Austr. J. Exp. Agric.* **21**, 189-195.
- DEATON, J.W., F.N. REECE, B.D. LOTT, 1986: Effect of summer cyclic temperatures versus moderate temperature on laying hen performance. *Poult. Sci.* **65**, 1649-1651.
- EMERY, D.A., P. VOHRA, R.A. ERNST, S.R. MORRISON, 1984: The effect of cyclic and constant ambient-temperatures on feed consumption, egg-production, egg weight, and shell thickness of hens. *Poult. Sci.* **63**, 2027-2035.
- GONZALEZ-ESQUERRA, R., S. LEESON, 2005: Effects of acute versus chronic heat stress on broiler response to dietary protein. *Poult. Sci.* **84**, 1562-1569.
- GUNAWARDANA, P., D.A. ROLAND, M.M. BRYANT, 2008: Effect of Energy and Protein on Performance, Egg Components, Egg Solids, Egg Quality, and Profits in Molted Hy-Line W-36 Hens. *J. Appl. Poult. Res.* **17**, 432-439.
- HARMS, R.H., G.B. RUSSELL, 1998: Layer performance when returned to a practical diet after receiving an amino acid-deficient diet. *J. Appl. Poult. Res.* **7**, 175-179.
- ISA, 2011: *Nutrition Management Guide*, 2011 Edition. ISA Hendrix Genetics, Saint Brieuc, France.
- KESHAVARZ, K., 1998: Further investigations on the effect of dietary manipulation of protein, phosphorus, and calcium for reducing their daily requirement for laying hens. *Poult. Sci.* **77**: 1333-1346.
- KESHAVARZ, K., 2003: Effects of reducing dietary protein, methionine, choline, folic acid, and vitamin B-12 during the late stages of the egg production cycle on performance and eggshell quality. *Poult. Sci.* **82**, 1407-1414.
- KLEYN, R., 2013: *Chicken nutrition. A guide for nutritionists and poultry professionals*. ISBN: 978-1-899043-42-2, 347 pages, Context 2013.
- LEE, K.H., Y.S. OHH, 2002: Effects of nutrient levels and feeding regimen of a.m. and p.m. diets on laying hen performances and feed cost. *Kor. J. Poult. Sci.* **29**, 195-204.
- LEESON, S., J.D. SUMMERS, 1978: Voluntary food restriction by laying hens mediated through dietary self-selection. *Br. Poult. Sci.* **19**, 417-424.

- MACISAAC, J.L., D.M. ANDERSON, 2007: Effect of whole wheat, enzyme supplementation and grain texture on the production performance of laying hens. *Can. J. Anim. Sci.* **87**, 579-589.
- MASHALY, M.M., G.L. HENDRICKS, M.A. KALAMA, A.E. GEHAD, H. PATTERSON, A.O. ABBAS, 2004: Effect of Heat Stress on Production Parameters and Immune Responses of Commercial Laying Hens. *Poult. Sci.* **83**, 889-894.
- MOGHADDAM, H.N., M.K. FARD, M.J. AGAH, S.J. HOSSEINI, M.T. MIRAKZEHI, 2012: Effect of different levels of methionine, protein and tallow on the productive performance and egg quality of laying hens in the late-phase production. *Braz. J. Poult. Sci.* **14**, 149-158.
- MOHITI-ASLI, M., M. SHIVAZAD, M. ZAGHARI, M. REZAIAN, S. AMINZADEH, G.G. MATEOS, 2012: Effects of feeding regimen, fiber inclusion, and crude protein content of the diet on performance and egg quality and hatchability of eggs of broiler breeder hens. *Poult. Sci.* **91**, 3097-3106.
- MUJAHID, A., 2011: Nutritional strategies to maintain efficiency and production of chickens under high environmental temperature. *J. Poult. Sci.* **48**, 145-154.
- NIR, I., J.P. MELCION, M. PICARD, 1990: Effect of particle-size of sorghum grains on feed-intake and performance of young broilers. *Poult. Sci.* **69**, 2177-2184.
- NOVAK, C., H. YAKOUT, S. SCHEIDELER, 2004: The combined effects of dietary lysine and total sulfur amino acid level on egg production parameters and egg components in Dekalb Delta laying hens. *Poult. Sci.* **83**, 977-984.
- PEGURI, A., C. COON, 1991: Effect of temperature and dietary energy on layer performance. *Poult. Sci.* **70**, 126-138.
- PEREZ-BONILLA, A., S. NOVOA, J. GARCIA, M. MOHITI-ASLI, M. FRIKHA, G.G. MATEOS, 2012: Effects of energy concentration of the diet on productive performance and egg quality of brown egg-laying hens differing in initial body weight. *Poult. Sci.* **91**, 3156-3166.
- REICHMANN, K.G., J.K. CONNOR, 1979: Effects of meal feeding of calcium, protein and energy on production and calcium status of laying hens. *Br. Poult. Sci.* **20**, 445-452.
- RCORE TEAM, 2012: R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing.
- ROBINSON, D., 1985: Performance of laying hens as affected by split time and split composition dietary regimens using ground and unground cereals. *Br. Poult. Sci.* **26**, 299-309.
- RUTTER, K., L. HENNOSTE, L.C. WARD, B.H. CORNISH, B.J. THOMAS, 1998: Bioelectrical impedance analysis for the estimation of body composition in rats. *Lab. Anim.* **32**, 65-71.
- SAKI, A.A., R.N. HARSINI, M.M. TABATABAEI, P. ZAMANI, M. HAGHIGHT, 2012: Estimates of methionine and sulfur amino acid requirements for laying hens using different models. *Braz. J. Poult. Sci.* **14**, 209-216.
- SAUVANT, D., J.-M. PEREZ, G. TRAN, 2004: Tables of composition and nutritional value of feed materials, INRA Editions and AFZ. Wageningen Academic Publishers, Paris, France.
- SCANES, C.G., R. CAMPBELL, P. GRIMINGER, 1987: Control of energy-balance during egg-production in the laying hen. *J. Nut.* **117**, 605-611.
- SMITH, A.J., 1973: Some effects of high environmental temperatures on the productivity of laying hens (a review). *Trop. Anim. Health Prod.* **5**, 259-271.
- SUMMERS, J.D., S. LEESON, 1994: Laying hen performance as influenced by protein intake to sixteen weeks of age and body weight at point of lay. *Poult. Sci.* **73**, 495-501.
- SYAFWAN, S., G.J.D. WERMINK, R.P. KWAKKEL, M.W.A. VERSTEGEN, 2012: Dietary self-selection by broilers at normal and high temperature changes feed intake behavior, nutrient intake, and performance. *Poult. Sci.* **91**, 537-549.
- TRAINEAU, M., I. BOUVAREL, C. Mulsant, L. ROFFIDAL, C. LAUNAY, P. LESCOAT, 2013: Effects on performance of ground wheat and with or without insoluble fiber or whole wheat in sequential feeding for laying hens. *Poult. Sci.* **92**, 2475-2486.

UMAR FARUK, M., E. DEZAT, I. BOUVAREL, Y. NYS, P. LESCOAT, 2008: Loose-mix and sequential feeding of mash diets with whole-wheat: effect on feed intake in laying hens. Proceedings of the XXIIIth World's Poultry Congress, Brisbane, Australia. p. 468.

UMAR FARUK, M., 2010: L'évaluation de l'alimentation mélangée et séquentielle à base de matières premières localement disponibles sur les performances des poules pondeuses en France et au Nigéria. Ph. D. Thesis, Université François-Rabelais de Tours.

UMAR FARUK, M., I. BOUVAREL, N. MEME, N. RIDEAU, L. ROFFIDAL, H.M. TUKUR, D. BASTIANELLI, Y. NYS, P. LESCOAT, 2010a: Sequential feeding using whole wheat and a separate protein-mineral concentrate improved feed efficiency in laying hens. Poult. Sci. **89**, 785-796.

UMAR FARUK, M., I. BOUVAREL, N. MÊME, L. ROFFIDAL, H.M. TUKUR, Y. NYS, P. LESCOAT, 2010b: Adaptation of wheat and protein-mineral concentrate intakes by individual hens fed ad libitum in sequential or in loose-mix systems. Br. Poult. Sci. **51**, 811-820.

UMAR FARUK, M., I. BOUVAREL, S. MALLET, M.N. ALI, H.M. TUKUR, Y. NYS, P. LESCOAT, 2011: Is sequential feeding of whole wheat more efficient than ground wheat in laying hens? Anim. **5**, 230-238.

WALLIS, I.R., D. BALNAVE, 1984: The influence of environmental-temperature, age and sex on the digestibility of amino-acids in growing broiler-chickens. Br. Poult. Sci. **25**, 401-407.

Correspondence: P. Lescoat, AgroParisTech, Département Sciences de la Vie et Santé – UFR Développement des Filières Animales, 16, rue Claude Bernard, 75231 Paris, France; E-mail: philippe.lescoat@agroparistech.fr

Fußnoten:

* INZO° SAS rue de l'Eglise-BP 50019 02407 Chierry Cedex

Troisième partie :
Discussion générale et Perspectives

Ce travail a été réalisé dans le but d'évaluer les systèmes d'alimentation alternatifs et de matières premières diversifiées pour le développement de filières avicoles en milieu chaud. Les résultats obtenus sont discutés sous trois angles : (i) la complémentarité des approches méta-analyse et expérimentations *in vivo*, (ii) les intérêts économiques de l'utilisation des matières premières alternatives présentés à travers une simulation économique dans un contexte béninois et (iii) l'adaptation de la poule en alimentation séquentielle et mélangée à l'élevage en milieu chaud. Des perspectives à travers de nouvelles questions découlant des travaux effectués sont également présentées.

1. Intérêts et implications économiques de l'utilisation de matières premières alternatives

1.1 Complémentarité des approches méta-analyse et expérimentations *in vivo*

L'aviculture est confrontée à une forte demande en matières premières pour l'alimentation des volailles. Cette forte demande suscite l'intérêt de l'utilisation d'autres matières premières, tant comme sources d'énergie que de protéines. Cependant, des résultats contradictoires ont été rapportés sur l'utilisation de sorgho ou du millet en remplacement du maïs et du tourteau de coton comme alternative au tourteau de soja. Les synthèses bibliographiques classiques ont constitué la démarche de base de l'intégration des connaissances scientifiques. Elles présentent néanmoins l'inconvénient d'un biais dans le choix des publications éligibles (Sauvant *et al.*, 2005). Selon ces auteurs, sans outils appropriés de traitement de l'information, il n'est guère possible d'intégrer précisément et fidèlement, des résultats en une connaissance cohérente. L'utilisation d'une approche par méta-analyse est donc apparue importante pour faire une synthèse des données disponibles et en dégager des lois de réponse générales à l'échelle de l'animal (Sauvant *et al.*, 2008). Contrairement aux synthèses qualitatives, la méta-analyse présente l'avantage de pouvoir intégrer des données issues d'expérimentations variées à travers des modèles statistiques appropriés. Elle permet d'apporter de nouvelles informations et de nouveaux résultats à des questions où des hypothèses théoriques étaient émises. Dans notre étude, deux objectifs étaient visés. Tout d'abord, il était important d'évaluer l'influence du type d'ingrédient sur l'ingestion et les performances de l'animal et ensuite de déterminer l'effet du niveau de substitution de la matière première sur les performances. L'approche par méta-analyse a permis de montrer que les performances de croissance du poulet de chair étaient affectées par le type de matière première utilisé. De meilleurs résultats ont été obtenus avec le millet en comparaison au sorgho et au tourteau de coton.

Cependant, la réalisation d'une méta-analyse permet de mettre en évidence les limites des publications (Philipps, 2005). Plusieurs données ont été publiées sur l'utilisation de matières premières alternatives chez la volaille mais peu d'entre elles sont exploitables. Par exemple, dans la base de données du Web of Science au moment où cette thèse a été rédigée, 135 articles ont été publiés sur l'utilisation du sorgho chez le poulet entre 1986 et 2013. Nous avons choisi de travailler sur les données publiées entre 1990 et 2013 au regard de l'évolution de la génétique. Les objectifs de la méta-analyse étaient d'évaluer l'effet d'une substitution d'une matière première alternative par rapport au maïs et au tourteau de soja. Nous n'avons ensuite retenu dans notre base de données que : (i) les expériences impliquant des souches commerciales de poulet ; (ii) des expériences dans lesquelles au moins deux de nos variables d'intérêt (consommation alimentaire, gain moyen quotidien indice de consommation) étaient indiquées et (iii) les expériences détaillant la liste des ingrédients et les caractéristiques nutritionnelles de base des régimes expérimentaux. Ce qui a permis de constituer une base de données contenant 190 traitements issus de 8 articles exploitables pour le sorgho, 5 pour le millet et 4 pour le tourteau de coton. Comparativement aux méta-analyses publiées par certains auteurs sur d'autres sujets (Letourneau Montminy *et al.*, 2010 ; van Milgen *et al.*, 2012), **notre étude permet de mettre en évidence l'insuffisance d'informations 'solides' et souligne la nécessité de validation de la valeur/qualité des données publiées pour les objectifs que nous nous sommes fixés.** Cette fonte du nombre d'articles ne remet toutefois pas en cause la pertinence des publications non retenues pour d'autres questions.

Par ailleurs, les informations relatives aux conditions environnementales de l'essai, aux variétés ou à la composition réelle des matières premières utilisées faisaient défaut dans les différents articles sélectionnés. Or, les performances sont très sensibles à ces conditions et à des détails de formulation, qu'il est difficile d'apprécier d'après les articles pris isolément (Cheng *et al.*, 1997 ; Selle *et al.*, 2010). L'effet d'une matière première est en réalité une confusion d'effets entre la matière première elle-même, les différences de nutriments dans les régimes après formulation, les différences de digestibilité (Selle *et al.*, 2010) non prises en compte, les problèmes éventuels d'appétence (Bouvarel *et al.*, 2010a), etc. Dans le cas d'une méta-analyse sur l'utilisation des matières premières, nous avons formulé des questions sur les facteurs antinutritionnels : quelles teneurs dans les régimes ? Quels effets sur les performances ? Ces questions n'ont pas pu être évaluées au regard des informations disponibles mais elles ont probablement affecté les résultats obtenus. Des hypothèses sous-jacentes ont été formulées et ont pu être validées *in vivo*. **La méta-analyse semble par**

conséquent être la méthode la plus intéressante pour s'abstraire des conditions expérimentales particulières et tracer des lois générales de réponses.

Néanmoins, les évaluations de matières premières réalisées dans les publications portent le plus souvent sur des substitutions simples, et ne reflètent pas forcément des conditions « réelles » avec des alternatives qui combinent plusieurs ressources. Ceci a donc justifié l'intérêt de l'étude *in vivo* pour évaluer les interactions entre ces matières premières. Ainsi, afin d'évaluer la précision des modèles obtenus, deux essais ont été réalisés avec le sorgho, le millet et le tourteau de coton. Les interactions potentielles qui pourraient être induites par l'incorporation simultanée de ces ingrédients sur les performances des poulets de chair et la digestibilité des nutriments ont été évaluées. Les résultats ont permis de confirmer les conclusions des méta-analyses et de mettre en évidence que **ces matières premières pouvaient être utilisées simultanément dans l'aliment du poulet sans détériorer les performances** (Figure 8). Une réduction des coefficients de digestibilité a été observée avec le sorgho et le tourteau de coton soulignant l'intérêt d'utiliser des procédés technologiques ou des additifs alimentaires pour améliorer la valeur de ces aliments (Bedford et Partridge, 2010). Cependant, les essais chez le poulet ont été réalisés en conditions environnementales standard. Etant donné les impacts de la température (Daniel et Balnave, 1981 ; Yahav, 2000), il paraît important de les mettre en place en conditions réelles en milieu chaud afin d'évaluer les interactions possibles entre les conditions thermiques, hygrométriques et les lois de réponse des poulets. Comme nous l'avons montré chez la poule pondeuse (*Chapitre 3*), les réponses des animaux peuvent être différentes lorsqu'on passe d'une station expérimentale à des conditions pratiques.

La mise en place des deux approches méta-analyse et essais *in vivo* est donc complémentaire pour répondre à des questions de recherche définies et confronter les résultats aux données réelles. **L'outil méta-analyse permet de réduire en amont le champ des possibilités d'hypothèses à tester et l'outil expérimental représente un passage 'obligé' où des régimes alimentaires sont formulés conformément aux besoins de l'animal et à la composition réelle des matières premières pour suggérer des solutions utilisables à plus grande échelle.** De plus, les essais réalisés *in vivo* ont permis d'approfondir les réflexions sur une ou plusieurs questions particulières.

Par ailleurs, l'utilisation de ces matières premières a été évaluée chez le poulet de chair dans une optique de validation des données sur des pas de temps relativement courts. Chez la poule

pondeuse, nous avons également fait la démarche de collecte des données sur l'utilisation du sorgho, du millet et du tourteau de coton. Malheureusement, le faible nombre de données disponibles à notre connaissance entre 1990 et 2013 n'a pas justifié l'intérêt d'une méta-analyse. Trois essais ont été identifiés avec du sorgho et 2 essais avec tourteau de coton, suggérant ainsi la nécessité de mettre en place des essais *in vivo* complémentaires. En revanche, 9 essais ont été identifiés pour le millet. Il est apparu intéressant d'évaluer brièvement les possibilités d'utilisation du millet chez la poule pondeuse. **Ainsi, l'analyse du méta-dispositif a montré que sur les deux périodes de production considérées (S20-35 et S35-56), la consommation d'aliment, le poids des œufs et la masse d'œufs n'ont pas été affectées par le millet.** Ces résultats sont similaires à ceux mesurés par Amni and Ruiz-Feria (2007) et Garcia *et al.* (2011) qui n'ont observé aucun effet du millet sur les performances chez la poule pondeuse. Cependant, Rama Rao *et al.* (2000) ont montré une réduction du poids des œufs avec l'utilisation du millet. Nos modèles indiquent des différences de poids des œufs relatives au témoin ($[Experimental - Control]/Control$) de -1,54 % et +0,88 % avec le millet respectivement à S20-35 et S35-56. Ces *deltas* ne sont pas significatifs. Ces différences de poids des œufs observés par ces auteurs sont supposées être liées aux quantités d'acide linoléique plus élevées dans les aliments pour maïs utilisés dans cet essai. L'acide linoléique est connu pour améliorer le poids de l'œuf et le maïs est une bonne source d'acide linoléique pouvant contenir 22 g/kg, tandis que le millet n'en contient que 8,4 g/kg (NRC, 1994). En outre, l'indice de consommation est similaire entre les aliments base millet et un aliment témoin à base de maïs. Aucun effet du niveau de substitution du millet n'a été observé (Figure 9). Ces résultats sont conformes à ceux obtenus avec le poulet et permettent de confirmer que **le millet constitue une alternative intéressante au maïs chez la volaille.** Des essais *in vivo* sont toutefois nécessaires pour évaluer les impacts sur la digestibilité et les marges d'amélioration possibles de sa valeur.

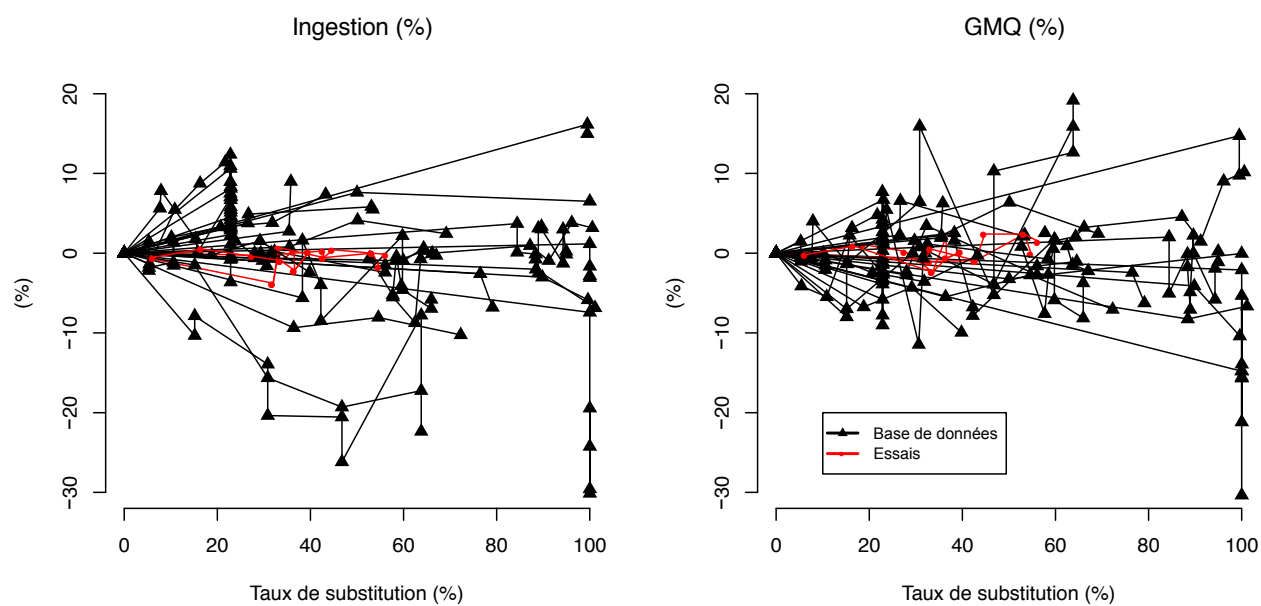


Figure 8 : Différences relatives au témoin en fonction du taux de substitution du sorgho, du millet et du tourteau de coton : comparaison des données des essais *in vivo* aux données de la méta-analyse

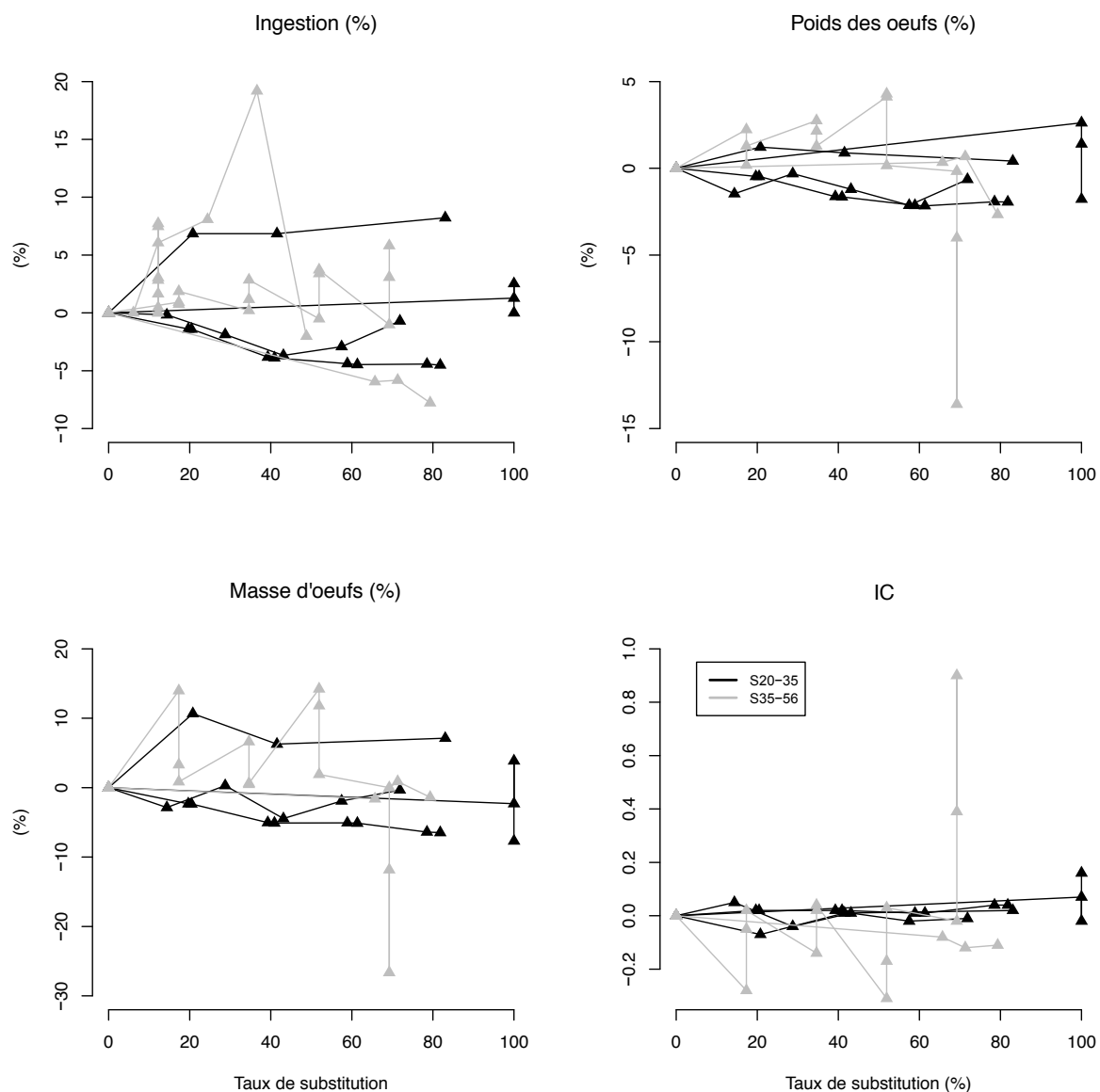


Figure 9 : Différences de performances relatives au témoin en fonction du niveau de substitution du millet (%) chez la poule pondeuse

1.2 Simulation économique des scénarios possibles d'utilisation des matières premières alternatives chez le poulet de chair

L'utilisation de matières premières alternatives au maïs et au tourteau de soja disponibles localement permet de réduire le coût de l'aliment dans des contextes où le prix de ces matières premières classiques augmente. Il est donc nécessaire de simuler l'intérêt économique découlant de l'utilisation des matières premières alternatives. Pour ce faire, nous avons réalisé **un calcul économique simplifié pour évaluer le prix d'intérêt de ces**

Tableau 1 : Composition centésimale et nutritionnelle des aliments utilisés pour la simulation économique

[illegible]

matières premières dans un contexte béninois. Un aliment témoin a été formulé avec des matières premières classiquement utilisées au Bénin et des substitutions ont été réalisées au regard des études expérimentales menées (*Chapitre 2*). Le son de blé est habituellement utilisé dans les aliments pour animaux. Il a donc été incorporé en remplacement du blé et les aliments reformulés (Tableau 1). Sachant qu'il s'agit d'une extrapolation de données expérimentales à un contexte tropical, plusieurs hypothèses ont été formulées dans le cadre de cette simulation :

- a) Les effets du sorgho, du millet et du tourteau de coton sont identiques dans un contexte tropical à ceux en milieu expérimental.
- b) Les performances obtenues en France sont supposées être similaires à celles pouvant être obtenues dans des élevages de poulets de chair au Bénin.
- c) L'incorporation du son de blé dans les aliments est considérée sans effet sur les performances obtenues, à teneur égale en nutriments.

Les prix utilisés dans cette simulation économique ont été relevés en septembre 2014 auprès des détaillants de matières premières (Tableau 2). Les prix du millet et du sorgho sont issus de la base de données de l'ONASA (ONASA, 2012). Au sud du Bénin (marché de Dantokpa), les deux matières premières étaient vendues en moyenne à 556 €/t en 2011 alors que dans le nord (marché de Parakou), elles étaient vendues à 269 €/t. La simulation économique présente deux scénarios possibles (figures 10 et 11) en tenant compte des lieux d'approvisionnement des matières premières alternatives et de divers paramètres économiques et zootechniques. Le scénario 1 a été réalisé en considérant les prix de sorgho et millet achetés dans le nord du Bénin et le scénario 2 a été simulé dans un contexte sud Bénin en considérant les prix d'achat de sorgho et du millet au marché de Dantokpa (Figure 10). Quel que soit le scénario considéré, les prix de vente du tourteau de coton et du maïs sont identiques.

Les résultats indiquent que la substitution du tourteau de coton dans des proportions de 25 % et 40 % par rapport au tourteau de soja permet de réduire le coût de l'aliment par kg de gain de poids respectivement de 5,2 % et de 4,8 %.

Le scénario 1 indique un meilleur gain économique avec tous les aliments à base de millet (Figure 9). Ce gain se fait notamment sur les indices de consommation inférieurs quand le millet est substitué au maïs. Dans ce scénario, il semblerait qu'une substitution du maïs par du sorgho ne soit rentable qu'à 60 % de substitution. Une substitution totale est moins

Tableau 2 : Prix des matières premières utilisées pour la simulation économique

	Prix détaillants sud Bénin (€/kg)	Prix détaillants nord Bénin (€/kg)
Maïs	0,27	
T. soja 48%	0,60	
Prémix chair	2,52	
T. coton 47%	0,28	
DL-Methionine	6,10	
L-Lysine HCl	3,81	
L-Thréonine	7,62	
Coquille d'huître	0,11	
Phosphate bicalcique	0,91	
Sel	0,30	
Huile de palme	1,07	
Son Blé	0,19	
Sorgho faible tanin	0,56	0,27
Millet	0,56	0,27

économique (+6,5 % du coût de l'aliment/kg de gain de poids) comparativement à un aliment base maïs. Néanmoins, une telle proportion peut être envisagée lorsque les prix du maïs augmentent. Bien qu'une combinaison de sorgho et de tourteau de coton dans un aliment pour poulet dégrade légèrement l'indice de consommation (1.58 vs. 1.50 pour l'aliment témoin), son plus faible coût de revient permettrait à l'éleveur d'avoir des performances économiques légèrement dégradées de 1,7 % par rapport à celles escomptées avec un aliment à base de maïs et de tourteau de soja.

Dans le scénario 2, les aliments à base de millet et de sorgho sont beaucoup moins avantageux avec des coûts d'aliment/kg de gain de poids supérieurs (+17,2 % et +41,6 % du coût aliment/gain de poids, respectivement pour S60 et S100) à ceux des aliments à base de maïs ou de tourteau de coton (-5,2 % et -4,8 %, respectivement pour C15 et C40). La hiérarchie indique comme alternative une substitution de maïs avec 60 % de millet (+ 13 %) ou une combinaison sorgho/tourteau de coton (+ 18,2 %) si les coûts du maïs et de tourteau de soja viennent à fluctuer largement sur les marchés du sud.

Cette simulation économique indique dans les conditions des travaux de cette thèse que le millet représente une bonne alternative à l'utilisation du maïs en milieu tropical. Le tourteau de soja peut être remplacé par du tourteau de coton et garantir un bon rapport coût aliment:vitesse de croissance aux éleveurs. Cependant, le millet et le sorgho sont des matières premières destinées également à l'alimentation humaine dans les régions arides et semi-arides. Elles sont notamment utilisées comme sources d'énergie et de protéines pour les populations les plus pauvres et les surplus de production sont vendus sur les marchés. La consommation par habitant de produits alimentaires à base de sorgho et de millet est nettement plus élevée dans les régions productrices rurales que dans les villes (FAO/INPHO, 1995). Toutefois, les politiques nationales dans un certain nombre de pays ont favorisé la consommation d'aliments à base de blé et de riz moins chers au détriment du sorgho et du millet. Ceci rend ainsi possible une utilisation accrue dans des élevages « modernes » de volailles. Par ailleurs, cette étude remet en lumière le débat sur la compétition entre homme et animal pour l'utilisation des ressources alimentaires. Or, il est important de mentionner que le développement des productions animales constitue plutôt une opportunité de développement des filières connexes. Ainsi, l'utilisation de matières premières vers l'animal ne se ferait donc pas au détriment de l'homme.

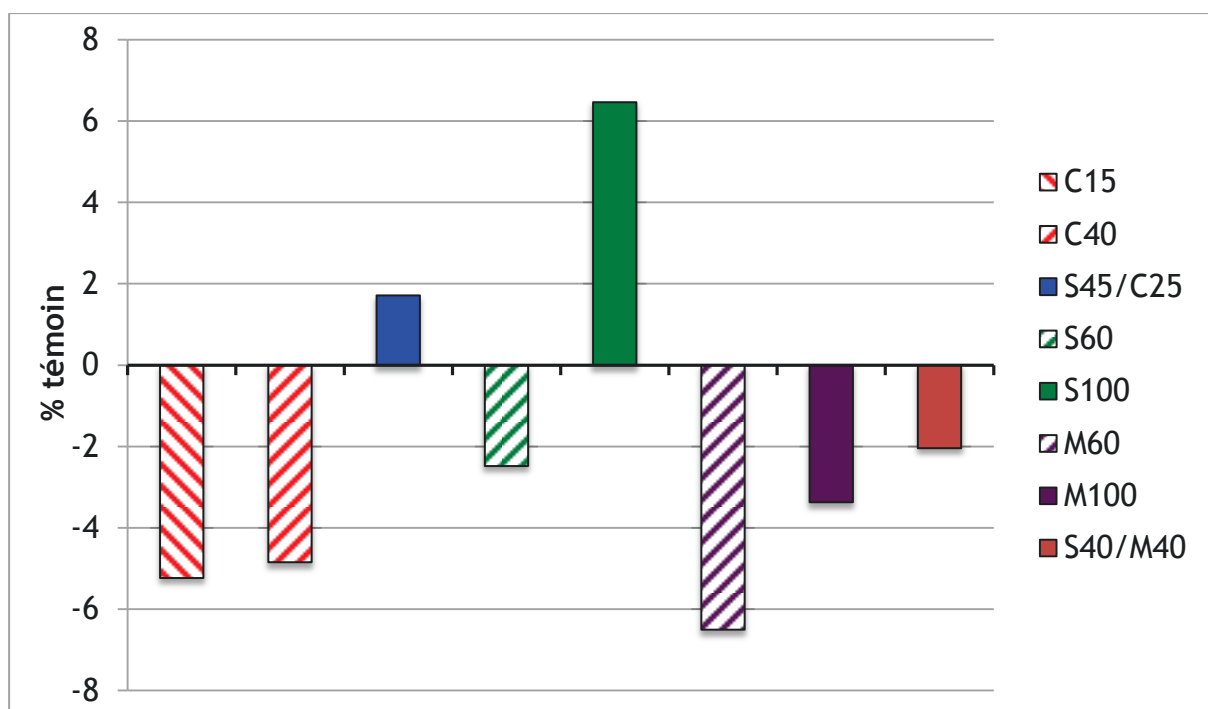


Figure 10 : Scénario 1 - Coût de l'aliment/kg de gain de poids relatif à un aliment témoin lorsque le millet et le sorgho sont achetées dans le nord du Bénin

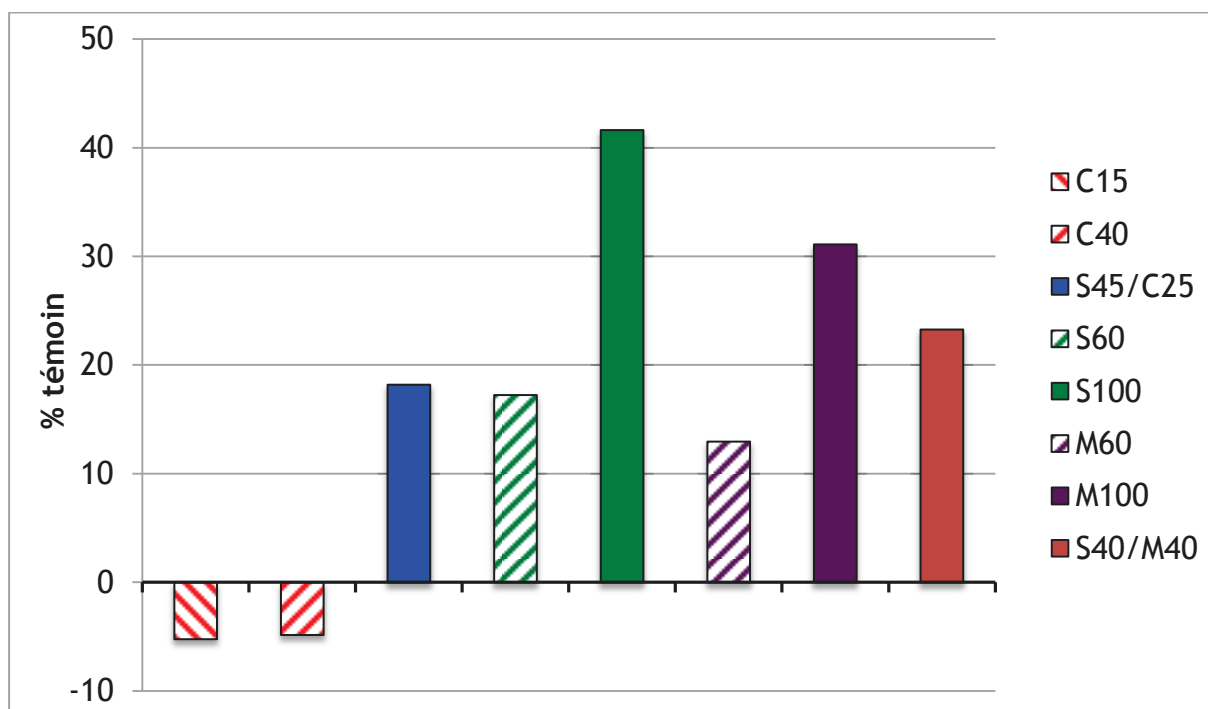


Figure 11 : Scénario 2 - Coût de l'aliment/kg de gain de poids relatif à un aliment témoin pour des matières premières achetées auprès de détaillants dans le sud du Bénin

C : tourteau de coton, S : sorgho, M : millet. Le chiffre représente le taux de substitution par rapport au tourteau de soja et au maïs.

2. Adaptation de la poule pondeuse en alimentation séquentielle et mélangée à l'élevage en milieu chaud

L'alimentation séquentielle et l'alimentation mélangée ont été rapportées comme des techniques innovantes permettant d'obtenir des performances de production équivalentes à une technique d'alimentation classique (Umar Faruk, 2010 ; Traineau, 2014). Cependant, l'expérimentation réalisée en milieu chaud et humide au Brésil a montré que ces techniques d'alimentation induisaient des performances très faibles chez des poules recevant du maïs entier ou broyé et un aliment protéique-minéral (*Publication 4*). Les poules en alimentation séquentielle ont eu une consommation d'aliment plus faible que celles en alimentation mélangée. Dans cette expérimentation, les animaux étaient dans des bâtiments semi-ouverts, exposés aux variations climatiques. Ces faibles performances ont été reliées à une incapacité des poules à réguler correctement leur ingestion, entraînant une fragilité potentielle et des difficultés à résister à des contraintes environnementales (Traineau *et al.*, 2013 ; Traineau *et al.*, 2014). Les résultats de la seconde expérimentation, obtenus en conditions de chaleur contrôlée et constante ont permis de confirmer l'hypothèse selon laquelle l'efficacité de ces systèmes d'alimentation n'est remise en cause qu'en environnement climatique variable (Batonon *et al.*, 2014). Lorsque les poules sont confrontées à des températures ambiantes élevées pendant une période longue et de nature cyclique, l'alimentation séquentielle constituerait un stress alimentaire supplémentaire, en ce sens que deux facteurs de réduction de la consommation alimentaire sont conjugués. L'alimentation séquentielle entraîne déjà une réduction de la consommation alimentaire qui serait exacerbée avec le stress thermique. Les performances sont par conséquent affectées. Ces observations soulignent donc une faiblesse de ces techniques d'alimentation : **une faible capacité d'adaptation des poules nourries selon ces modes de distribution face à des perturbations environnementales** (ressources alimentaires limitées, agression par un pathogène, stress thermique). En effet, selon Martin et Sauvante (2010a), la réponse adaptative des animaux s'exprime selon différentes modalités. Des animaux soumis à différentes perturbations peuvent résister, se déformer ou se transformer, définissant respectivement la notion de rigidité, de flexibilité ou d'élasticité et de plasticité. La figure 12 illustre schématiquement ces notions. Il semblerait donc y avoir deux cas de figures chez les poules en alimentation séquentielle ou mélangée en milieu chaud : (1)

lors d'une exposition à une température constante, on observe une certaine *flexibilité* avec des poules qui dévient légèrement de la trajectoire de production initiale mais se réadaptent suivant un nouvel objectif et (2) lors d'une variation des conditions externes, les poules subissent une succession de stress qui empêche certaines d'entre elles de s'y adapter. L'animal cherche donc à assurer sa propre survie par un arrêt de la production (Martin et Sauvant, 2010b). Nous avons illustré deux scénarios possibles d'adaptation des poules en alimentation séquentielle par la figure 13. Ces scénarios sont toutefois théoriques et méritent d'être développés à travers d'autres études. Il convient alors en complément de ce travail de suggérer des modèles téléonomiques décrivant chez la poule l'évolution des priorités en fonction de son âge, en réponse à un stress environnemental et à des systèmes d'alimentation différents (Martin et Sauvant, 2010b).

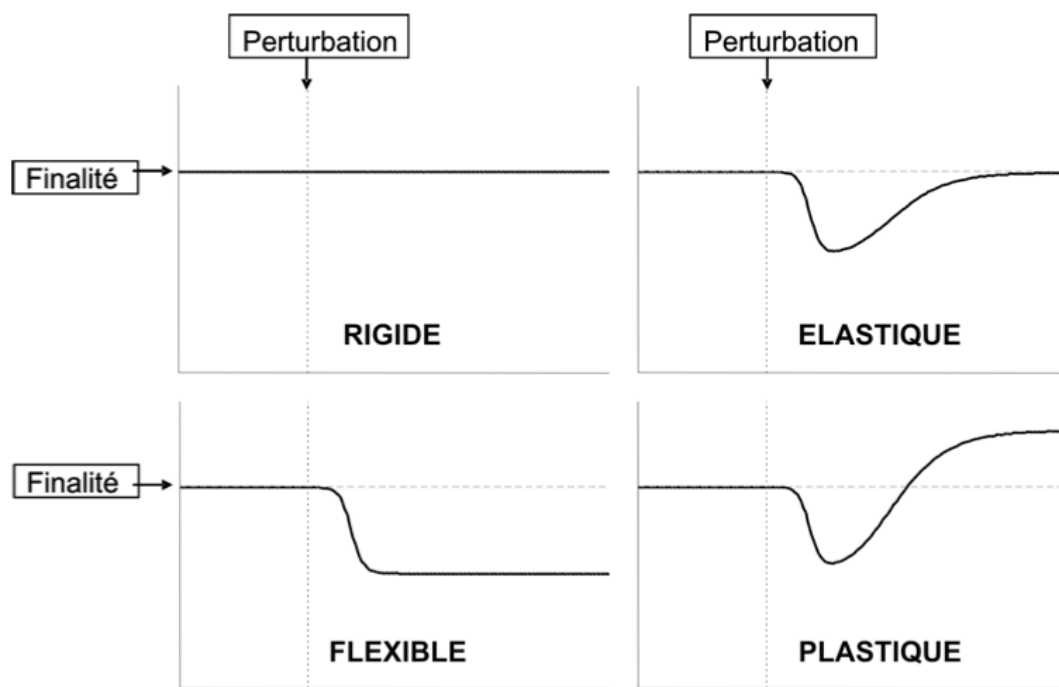


Figure 12 : Modalités des réponses dynamiques d'un système perturbé (Martin et Sauvant, 2010a)

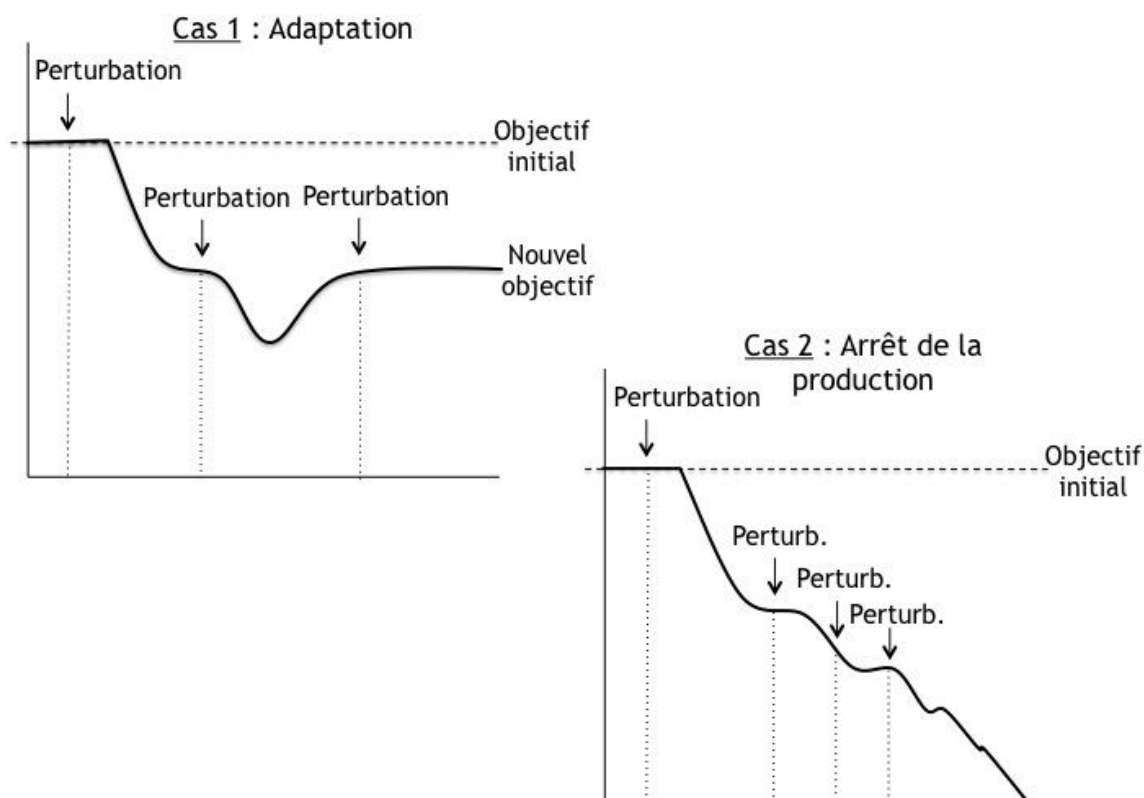


Figure 13 : Illustration des scénarios possibles d'adaptation à la chaleur pour des poules en alimentation séquentielle

En outre, nous nous sommes intéressés dans ces travaux à des réponses de groupes, les poules ayant été élevées respectivement en cages collectives (*Publication 4*) et en cages individuelles avec mangeoires communes (*Publication 5*). Malgré les interactions sociales favorisant une imitation des congénères pour la consommation d'aliment (Meunier-Salaün et Faure, 1984), il existe une forte variabilité individuelle des réponses. **Des performances de ponte similaires au régime témoin ont été observées chez certaines poules en alimentation séquentielle alors que d'autres poules ne pondaient pas** (*Publication 4*). Cette variabilité individuelle a également été mise en évidence en conditions tempérées par Umar Faruk *et al.* (2010c) chez des poules ayant reçu du blé entier et un aliment complémentaire de façon séquentielle ou mélangée. Cette variabilité de performances était peu présente pour les poules ayant reçu une fraction énergétique à la place de céréales entières ou grossièrement broyées (Batonon *et al.*, 2014). La fraction énergétique distribuée le matin était un mélange de céréales broyées avec 20 % de blé entier. Si la variabilité des réponses peut être attribuée au tri particulier observé chez les poules en alimentation mélangée, cette question reste encore inexpliquée chez les poules en système d'alimentation séquentielle. La variabilité individuelle observée chez des

poules en séquentiel, élevées dans un même environnement serait-elle à relier à la nature de leur ingéré ? Les éléments présentés dans ce travail ne permettent pas d'y répondre mais des réponses pourraient être apportées dans des travaux ultérieurs. Un travail de modélisation du comportement alimentaire en lien avec les flux métaboliques à l'échelle de l'animal peut être suggéré pour mieux comprendre les mécanismes responsables de la variabilité des réponses en alimentation séquentielle.

Par ailleurs, les techniques d'alimentation séquentielle et mélangée sont connues pour être plus économiques et efficaces dans les pays où le coût de transport et de transformation des matières premières est élevé. Ces techniques d'alimentation permettent l'utilisation de céréales disponibles localement en circuit court dans les élevages (Blair *et al.*, 1973). L'intérêt de ces méthodes est d'autant plus important pour des éleveurs vivant dans des zones difficiles où l'accès à l'aliment nécessite un investissement onéreux dans les moyens de transport (Umar Faruk, 2010). Ces systèmes ont été testés avec du blé entier en France (Umar Faruk *et al.*, 2010b), du millet (Umar Faruk *et al.*, 2010a) et du maïs (*Publication 4*) en milieu chaud. Nous avons montré dans nos travaux que **le maïs entier est plus prometteur en alimentation séquentielle que le maïs broyé alors que le contraire a été observé pour l'alimentation mélangée**. Les poules recevant du maïs broyé en alimentation séquentielle en consommaient plus (65 % de la consommation totale) et suite à une capacité d'encombrement limitée, mangeaient moins d'aliment protéique-minéral (Bouvarel *et al.*, 2010a). Or, les performances de ponte sont liées à un approvisionnement suffisant en protéines et en acides aminés (Keshavarz, 2003; Moghaddam *et al.*, 2012). Toutefois, il est important de mieux définir les modalités d'application de ces techniques. Bien que le mélange de maïs broyé et d'un aliment complémentaire permette d'avoir des performances similaires au témoin, il entraîne des coûts supplémentaires pour le broyage de la céréale. Inversement, la distribution séquentielle de céréales entières est une solution envisageable pour l'aviculture tropicale puisqu'elle permet d'économiser les coûts de broyage de la céréale. De plus, la distribution ou le mélange de deux types d'aliments est plus facile à mettre en œuvre dans des systèmes d'élevage où la main d'œuvre est largement disponible et l'aliment est déjà apporté manuellement deux ou trois fois par jour comme c'est le cas au Bénin (*Chapitre 1*). Quelle que soit la technique employée, il y a lieu de s'interroger sur les systèmes d'élevage dans lesquels ils s'intègrent le mieux. **Au regard des conclusions des différentes études, nous pouvons supposer que l'alimentation séquentielle serait plus adaptée pour des élevages de type industriel (Eleveur 1, Chapitre 1) où les conditions environnementales sont**

maîtrisées alors que l'alimentation mélangée serait plus avantageuse pour des élevages de petites tailles, de types ouverts (*Elevage de type 2 et 3, Chapitre 1*). Si l'on tient compte des scénarios futurs envisagés pour la filière de production d'œufs au Bénin, nous pouvons imaginer que ces types d'élevage (*Elevage de type 2 et 3, Chapitre 1*) s'approvisionneraient en aliment protéique-minéral auprès d'acteurs spécialisés et feraient le mélange des aliments sur leurs exploitations.

En revanche, dans le contexte actuel de volatilité des prix, il serait intéressant d'offrir la possibilité aux éleveurs d'utiliser les matières premières suggérées dans cette étude (*Chapitre 2*) en alimentation séquentielle et mélangée. Umar Faruk *et al.* (2010a) ont montré qu'une meilleure efficacité alimentaire était obtenue lorsque le millet est distribué en graines entières de façon séquentielle ou mélangée avec un aliment protéique-minéral en milieu chaud. Usman Baba (2012) a montré que le sorgho entier apporté en alimentation séquentielle entraîne une réduction de la production d'œufs pour une consommation d'aliment similaire à un régime à base de maïs. L'indice de consommation est ainsi détérioré. A l'instar des travaux effectués dans le chapitre 2, il est important de s'interroger sur l'utilisation d'un mélange de ces matières premières (maïs/millet ; maïs/sorgho ; millet/sorgho) dans un système d'alimentation séquentielle ou mélangée.

Conclusion

Les travaux réalisés permettent de mieux comprendre les interactions entre matières premières alternatives et d'évaluer l'applicabilité des systèmes d'alimentation séquentielle et mélangée en milieu chaud. Par une approche alliant méta-analyse et expérimentations *in vivo* chez le poulet de chair, les travaux ont porté sur l'utilisation du sorgho et du millet en remplacement du maïs et du tourteau de coton à la place du tourteau de soja. Nous avons montré qu'il était possible de combiner ces matières premières dans l'aliment destiné au poulet sans affecter la consommation alimentaire et la vitesse de croissance. Une simulation économique a proposé des scénarios d'utilisation en pratique dans un contexte béninois. Elle a permis de montrer qu'en cas d'augmentation des prix du maïs et du tourteau de soja, les éleveurs de poulets de chair peuvent substituer ces matières premières par celles proposées et conserver un bon rapport coût aliment:gain de poids. Des travaux complémentaires sont nécessaires, notamment chez la poule pondeuse pour suggérer d'autres matières premières utilisables en pratique et garantir une certaine flexibilité aux éleveurs et fabricants d'aliments.

Les travaux réalisés chez la poule pondeuse ont mis en évidence une forte variabilité des performances et une faible capacité d'adaptation des poules nourries selon des techniques d'alimentation séquentielle et mélangée face à des perturbations environnementales. Des performances de ponte similaires au régime témoin ont été observées chez certaines poules en alimentation séquentielle alors que d'autres poules ne pondaient pas. Les connaissances sur ces systèmes d'alimentation en milieu chaud ont progressé mais ces observations amènent à s'interroger sur les modalités d'application de ces techniques dans des systèmes d'élevage tropicaux. Il est également important d'évaluer la combinaison de paquets techniques utiles et adaptés aux besoins de l'animal en fonction des contextes socio-économiques. Les systèmes d'alimentation séquentielle et mélangée pourraient être adaptés sur une période de production (sur la phase d'élevage ou en début de ponte) où les gains économiques sont très faibles par rapport aux fonds investis comme cela peut être le cas au Bénin par exemple. Un pilotage entre alimentation séquentielle/mélangée et alimentation classique est une piste pouvant redonner une certaine liberté à l'animal.

Au delà d'une optimisation ou d'un bénéfice économique, les travaux réalisés dans cette thèse montrent qu'il y a des risques à s'éloigner du paquet technique standard. Ces risques sont soit liés à l'incertitude autour des réponses à des ingrédients alternatifs (variabilité des réponses dans la méta-analyse, *Chapitre 2*) ou à des problèmes de consommation en alimentation séquentielle ou mélangée dans certains contextes. On passe donc d'un raisonnement

coût/bénéfice à un raisonnement risque/bénéfice où l'éloignement au modèle classique maïs/soja n'est acceptable que s'il est plus intéressant que le risque technique pris. Dans ce sens on peut considérer que le surcoût dû à l'utilisation du maïs/soja correspond à une « prime d'assurance ». On accepte de payer celle-ci si son montant n'est pas trop élevé mais uniquement dans certains contextes où les éleveurs ou fabricants peuvent être amenés à prendre le risque de s'en passer.

Bibliographie

Les articles publiés comprennent chacun leur liste bibliographique. La liste ci-dessous concerne les références citées dans les parties non publiées de la thèse : introduction, première partie, troisième partie, conclusion.

A

- AIN BAZIZ, H., GERAERT, P.A., PADILHA, J.C. et GUILLAUMIN, S. 1996. Chronic heat exposure enhances fat deposition and modifies muscle and fat partition in broiler carcasses. *Poult. Sci.* 75, 505–513.
- AL-FATAFTAH, A.R.A et ABU-DIEYEH, Z.H.M. 2007. Effect of chronic heat stress on broiler performance in Jordan. *Int. J. Poult. Sci.* 6, 64–70.
- AMINI, K. et RUIZ-FERIA, C. A. 2007. Evaluation of pearl millet and flaxseed effects on egg production and n-3 fatty acid content', *Brit. Poult. Sci.*, 48, 6, 661-668.
- AUSTIC, R.E. 1985. Feeding poultry in hot and cold climates. In : YOUSSEF, M.K. (éd.), *Stress Physiology in Livestock*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1985, pp 123-136.
- AZMAN, M.A. et YILMAZ, M. 2005. The growth performance of broiler chicks fed with diets containing cottonseed meal supplemented with lysine. *Revue de Médecine Vétérinaire*, 156, 104-106.

B

- BALNAVE, D. et BRAKE, J. 2005. Nutrition and management of heat-stressed pullets and laying hens. *World's Poult. Sci. J.*, 61, 399-406.
- BASTOS, S.C., FREIRE FUENTES, M.F.F., FREITAS, E.R., ESPINDOLA, G.B. et BRAGA, C.V.De P. 2007. Efeito da inclusão do farelo de coco em rações para frangos de corte. *Rev. Ciencia Agron.*, 38 (3), 297-303.
- BATONON, D. I., TRAINEAU, M., BOUVAREL, I., ROFFIDAL, L. et LESCOAT, P. 2014. Capacity of laying hens in sequential feeding to adjust their feed consumption when offered previously a nutritionally unbalanced diet. *European Poultry Science*, doi: 10.1399/eps.2014.37.
- BAURHOO, N., BAURHOO, B., MUSTAFA, A.F. et ZHAO X. 2011. Comparison of corn-based and Canadian pearl millet-based diets on performance, digestibility, villus morphology, and digestive microbial populations in broiler chickens. *Poultry Science*, 90, 579–586.
- BEDFORD, M.R. et PARTRIDGE, G.G. 2010. *Enzymes in farm animal nutrition*. CAB International, London, UK.
- BELAL, N. G., ABDELATI, K. A., ALBALA, S. et ELAWAD, S. 2011. Effect of dietary processed

- cowpea (*Vigna unguiculata*) seeds on broiler performance and internal organ weights. *Res. J. Anim. Vet. Sc.*, 6: 6-11.
- BELLO, K.M., OYAWOYE, E.O., BOGORO, S.E. et DASS, U.D. 2011. Performance of broilers fed varying levels of palm kernel cake. *Int. J. Poult. Sci.*, 10(4), 290-294.
- BELMAR, R., NAVA-MONTERO, R., SANDOVAL-CASTRO, C. et McNAB, J.M. 1999. Jack bean (*Canavalia esniformis* L.) in poultry diets : antinutritional factors and detoxification studies – a review. *World's Poultry Science Journal*, Vol. 55, 37-59.
- BLAIR, R., DEWAR, W.A. et DOWNIE, J.N. 1973. Egg production responses of hens given a complete mash or unground grain together with concentrate pellets. *Brit. Poult. Sci.*, 14, 373-377.
- BLESBOIS, E. 2010. Quelles recherches pour l'aviculture en France ? *Inra Prod. Anim.*, 5, 427-432.
- BLUNDELL, J.E. 1991. Pharmacological approaches to appetite suppression. *Trends Pharmacol. Sci.*, 12, 147-157.
- BOUVAREL, I., BARRIER-GUILLOT, B., LARROUDE, P., BOUTTEN, B., LETERRIER, C., MERLET, F., VILARINO, M., ROFFIDAL, L., TESSERAUD, S., CASTAING, J. et PICARD, M. 2004. Sequential feeding programs for broiler chickens: twenty-four- and forty-eight-hour cycles. *Poult. Sci.*, 83(1), 49-60.
- BOUVAREL, I., TESSERAUD, S. et LETERRIER, C. 2010a. L'ingestion chez le poulet de chair : n'oublions pas les régulations à court terme. *INRA Prod. Anim.*, 23(5), 391-404.
- BOUVAREL, I., NYS, Y., PANHELEUX, M. et LESCOAT, P. 2010b. Comment l'alimentation des poules influence la qualité des œufs ? *INRA Prod. Anim.*, 23(2), 167-181.
- BOUVAREL, I., LESSIRE, M., NARCY, A., DUVAL, E., GRASTEAU, S., QUINSAC, A., PEYRONNET, C., TRAN, G., HEUZE, V. 2014. Des sources de protéines locales pour l'alimentation des volailles : quelles voies de progrès ? *Oilseeds & fat Crops and Lipids*, 21(4), 1-6.
- BRAGA, C.V. DE P., FREIRE FUENTES, M.F., FREITAS, E.R., DE CARVALHO, L.E., DE SOUSA, F.M. et BASTOS, S.C. 2005. Effect of inclusion of coconut meal in diets for laying hens. *Rev. Bras. Zootec.*, 34 (1), 76-80.
- BRAKE, J. D., BRANN, D. E. et GRIFFEY, C. A. 1997. Barley without enzyme supplementation in broiler grower and finisher diets. *J. Appl. Poult. Res.*, 6, 422-431.

C

- CHAH, C.C. et MORAN, E.T. 1985. Egg characteristics of high-performance hens at the end of lay when given cafeteria access to energy, protein, and calcium. *Poult. Sci.*, 64, 1696- 1712.
- CHAKAM, V. P., TEGUIA, A. et TCHOUMBOUE, J., 2010. Performance of finisher broiler chickens as affected by different proportions of cooked cowpeas (*Vigna unguiculata*) in the grower-finisher diet. *African J. Food Agric. Nutr. Dev.*, 10 (4), 2427-2438.

- CHENG, T.K., HAMRE, M.L. et COON, C.N. 1997: Effect of environmental temperature, dietary protein, and energy levels on broiler performance. *J. Appl. Poult. Res.*, 6, 1-17.
- CHESSON, A., 2001. Non-starch polysaccharide degrading enzymes in poultry diets: influence of ingredients on the selection of activities. *World's Poult. Sci. J.*, 57 (3), 251-263
- CHEVALIER, D., ANDRE, S., MERLET, F., BESSON, M., MILIER, E. et BOUVAREL, I. 2007. Incorporation de céréales à la ferme dans l'alimentation des volailles de chair en filière longue. *7èmes Journées de la Recherche Avicole, Tours*, 188-192.
- CHONG, C. H., ZULKIFLI, I. et BLAIR, R, 2008. Effects of dietary inclusion of palm kernel cake and palm oil, and enzyme supplementation on performance of laying hens. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.*, 21 (7), 1053-1058.
- COSTA, E.F., MILLER, B.R., PASTI, G.M., BAKALLI, R.I. et EWING, H.P. 2001. Studies on feeding peanut meal as a protein source for broiler chicken. *Poult. Sci.* 80, 306–313.
- CUMMING, R. B. 1984. Choce feeding of laying birds. *Proceedings of Poultry Husbandry Research Foundation Symposium*, University of Sydney, Australia pp 68-71.

D

- de BASILIO, V. et PICARD, M. 2002. La capacité de survie des poulets à un coup de chaleur est augmentée par une exposition précoce à une température élevée. *INRA Prod. Anim.*, 15(4), 235-245.
- Del CARMEN, J., GERNAT, A.G., MYRMAN, R. et CAREW, L. B., 1999. Evaluation of raw and heated velvet beans (*Mucuna pruriens*) as feed ingredients for broilers. *Poult. Sci.*, 78 (6), 866-872.
- DAGHIR, N.J., AYYASH, B. et PELLET, P.L. 1969. Evaluation of groundnut meal protein for poultry. *J. Sci Food Agric.* 20, 349–354.
- DAGHIR, N.J.. 2008. Poultry production in hot climate. 2nd Ed. CAB International, London UK, 401p.
- DIALLO B., NANGO D. et STAATZ J. 2011. Impact des cours mondiaux sur les prix des céréales ouest africaines : bilan, opportunités et risques. *Grain de sel*, N°54-56, Avril-Décembre 2011, 3 p.
- DANIEL, M. et BALNAVE, D. 1981. Responses of laying hens to gradual and abrupt increases in ambient-temperature and humidity. *Austr. J. Exp. Agric.*, 21: 189-195.
- DAVIS, A.J., DALE, N.M. et FERREIRA, F.J. 2003. Pearl millet as an alternative feed ingredient in broiler diets. *Journal of Applied Poultry Research*, 12, 137–144.

E

- EGBUNIKE, G.N., AGIANG, E.A., OWOSIBO, A.O. et FATUFE, A.A. 2009. Effect of protein on performance and haematology of broilers fed cassava peel based diets. *Arch. Zootec.*, 58, 655-662.

- EMIOLA, A.I., OLOGHOB, A.D. et GOUS, R.M. 2007. Influence of processing of mucuna (*Mucuna pruriens* var *utilis*) and kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) on the performance and nutrient utilization of broiler chickens. *J. Poult. Sci.*, 44 (2): 168-174.
- ERUVBETINE, D. et AFOLAMI, C.A. 1992. Economic evaluation of cassava (*Manihot esculenta*) as a feed ingredient for broilers. *Proceedings of the 19th World's Poultry Congress, Vol. 3*, pp. 532–535.
- EZIESHI, E.V. et OLOMU, J.M. (2004) Comparative performance of broiler chickens fed varying levels of palm kernel meal and maize offal. *Pakistan Journal of Nutrition* 3(4), 254–257.

F

- FAO/INPHO 1995. Le sorgho et les mils dans la nutrition humaine. Rome, FAO, 1995. (Consulté le 30/092014). <http://www.fao.org/docrep/T0818F/T0818F00.htm>.
- FAO 2011. *L'élevage dans le monde en 2011 – Contribution de l'élevage à la sécurité alimentaire*. Rome : FAO, 2011, 150 p.
- FAO, 2014. Situation alimentaire mondiale : indice FAO des prix des produits alimentaires. Consulté le 21 Août 2014 sur <http://www.fao.org/worldfoodsituation/foodpricesindex/fr/>.
- FAOSTAT, 2014. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAOSTAT database. Consulté le 30 Août 2014 sur <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/P/PP/E>.
- FERNANDEZ, R. et MCGINNIS, J. 1974. Nutritive value of triticale for young chicks and effect of different amino acid supplements on growth. *Poult. Sci.* 53, 47–53.
- FORBES, J.M. et COVASA, M. 1995. Application of diet selection by poultry with particular reference to whole cereales. *World's Poult. Sci. J.*, 51: 149-165.
- FUENTES, M.F.F., COELHO, M.G.R., SOUZA, F.M., LOPES, I.R.V. et PEREIRA, L.I. 1992. Sun-dried cassava meal in tropical broiler diets. *Proceedings of the 19th World's Poultry Congress, Vol. 3*, p. 551.

G

- GABRIEL, I., MALLET, S., et LECONTE, M. 2003. Differences in the digestive tract characteristics of broiler chickens fed on complete pelleted diet or on whole wheat added to pelleted protein concentrate. *Brit. Poult. Sci.*, 44: 283-290.
- GARCIA, A.N.Q.M, MURAKAMI, A.E., FURLAN, A.C., MASSUDA, E.M., POTENÇA, A. et ROJAS, I.C.O. 2011. Pearl millet in the diet of laying hens. *Acta Scientiarum Animal Sciences Maringá*, v. 33, n. 1, p. 73-75.
- GERAERT, P.A. 1991. Métabolisme énergétique du poulet de chair en climat chaud. *INRA Prod. Anim.*, 4(3), 257-267.
- GOUS RM et Du PREEZ, J.J. 1975. The sequential feeding of growing chickens. *Brit. J. Nut.*, 34, 113-118.

H

- HARMS, R.H., RUSSELL, G.B. ET SLOAN, D.R. 2000. Performance of four strains of commercial layers with major changes in dietary energy. *J. Appl. Poult. Res.*, 9, 535-541.
- HETLAND, H., SVIHUS, B., et KROGDAHL, A. 2003. Effects of oats hulls and wood shavings on digestion in broilers and layers fed diets based on whole wheat. *Brit. Poult. Sci.*, 44, 275-282.
- HEUZE, V., TRAN, G. et LEBAS, F. 2012. Sorghum grain. Feedipedia.org. A programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO. Retrieved on 8th august 2014 from <http://www.feedipedia.org/node/724>.
- HEUZE V., SAUVANT D., TRAN G. et BASTIANELLI D. 2013. Copra meal and coconut by-products. Feedipedia.org. A programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO. (Consulté le 22/09/2014). <http://www.feedipedia.org/node/46>.
- HEUZE V., TRAN G., BASTIANELLI D., ARCHIMEDE H., LEBAS F. et REGNIER, C. 2014. Cassava peels, cassava pomace and other cassava by-products. Feedipedia.org. A programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO. (Consulté le 22/09/2014). <http://www.feedipedia.org/node/526>.
- HIDALGO, M.A., DAVIS, A.J., DALE, N.M. et DOZIER III, W.A. 2004. Use of whole pearl millet in broiler diets. *Journal of Applied Poultry Research*, 13, 229–234.
- HRUBY, M., HAMRE, M.L. et COON, C.N. 1995. Predicting amino acid requirements for broilers at 21.1°C and 32.2°C. *J. Appl. Poult. Res.*, 4:395-401.

J

- JACOB J.P., MITARU B.N., MBUGUA P.N. et BLAIR, R. 1996. The effect of substituting Kenyan Serena sorghum for maize in broiler starter diets with different dietary crude protein and methionine levels. *Animal Feed Science and Technology* 61, 27-39.
- JACOBS, C. et PARSONS, C.M. 2013. The effects of coarse ground corn, whole sorghum, and a prebiotic on growth performance, nutrient digestibility, and cecal microbial populations in broilers fed diets with and without corn distillers dried grains with solubles. *Poultry Science* 92, 2347–2357.
- JEROCH, H. et DANICKE, S. 1995. Barley in poultry feeding: a review. *World's Poult. Sci. J.*, 51 (3), 271-291.

K

- KARUNAJEEWA, H. 1978. The performance of crossbred hens given free choice feeding of whole grains and a concentrate mixture and the influence of source of xanthophylls on yolk color. *Brit. Poult. Sci.*, 19, 699-708.
- KEMPSTER, H. L. 1916. Food selection by laying hens. *Journal of the American Association of Instructors and Investigators in Poultry Husbandry* 3, 26-28.

KORANE, U. N., SARAG, A. N., SADEKAR, R. D., SIROTHIA, A. R. et JAHAGIRDAR, S. W. 1991. Studies on replacement of maize with prosomillet (*Panicum miliaceum*) in layer ration. *Poultry Adviser*, 24 (4), 37-40.

L

LARBIER, M. et LECLERCQ, B. 1992. Nutrition et alimentation des volailles. INRA Editions, 368 p.

LECUELLE, S., BOUVAREL, I., CHAGNEAU, A.M., LAVIRON, F., LESCOAT, P. et LETERRIER, C. 2011. Early visual experience of food does not appear to reduce subsequent feed neophobia in turkey. *Poult. Sci.*, 90(1), 1-9.

LEESON, S. et SUMMERS, J.D. 1987. Response of white Leghorns to diets containing ground or whole triticales. *Canadian Journal of Animal Science* 67, 583–585.

LEESON, S. et CASTON, L.J. 1993. Production and carcass yield of broilers using free-choice cereal feeding. *J. Appl. Poult. Res.*, 2, 253-258.

LETOURNEAU-MONTMINY, M.P., NARCY, A., LESCOAT, P., BERNIER, J.F., MAGNIN, M., POMAR, C., NYS, Y., SAUVANT, D. et JONDREVILLE, C. 2010. Meta-analysis of phosphorus utilisation by broilers receiving corn-soyabean meal diets: influence of dietary calcium and microbial phytase. *Anim.*, 4 (11), 1844-1853.

LIMA, R.C., FUENTES, M.F.F., FREITAS, E.R., SUCUPIRA, F.S., MOREIRA, R.F. et BRAZ, N.M. 2007. Coconut meal in laying hens diets: nutrients digestibility, performance and egg quality. *Rev. Bras. Zootec.*, 36 (5), 1340-1346.

LIN, H., ZHANG, H. F., JIAO, H. C., ZHAO, T., SUI, S. J., GU, X. H., ZHANG, Z. Y., BUYSE, J. et DECUYPERE, E. 2005. Thermoregulation responses of broiler chickens to humidity at different ambient temperatures. I. One week of age. *Poult. Sci.*, 84, 1166–1172.

M

MAGDELAINE, P. et BRAINE, A. 2010. Panorama mondial et européen de la production et de la consommation d'œufs. *INRA Prod. Anim.* 23, 111-122.

MAGDELAINE, P. 2014. Panorama mondial de l'aviculture chair et enjeux de compétitivité pour la France. In Quelle place en France pour une filière intensive de volailles de chair, Académie d'Agriculture de France, 2014. Séance du 7 mai.

MARDSSEN, A. et MORRIS, T. R. 1987. Quantitative review of the effect of environmental temperature on food intake, egg output and energy balance in laying pullets. *Brit. Poult. Sci.*, 28, 693-704.

MARTIN, O. et SAUVANT D. 2010a. Robustesse, rusticité, flexibilité, plasticité... les nouveaux critères de qualité des animaux et des systèmes d'élevage : définitions systémique et biologique des différents concepts. *INRA Prod. Anim.*, 23(1), 5-10.

- MARTIN, O. et SAUVANT D. 2010b. A teleonomic model describing performance (body, milk and intake) during growth and over repeated reproductive cycles throughout the lifespan of dairy cattle. 1. Trajectories of life function priorities and genetic scaling. *Animal*. 4, 2030-2047.
- MASHALY, M.M., HENDRICKS, G.L., KALAMA, M.A., GEHAD, A.E., PATTERSON, H., et ABBAS, A.O. 2004: Effect of Heat Stress on Production Parameters and Immune Responses of Commercial Laying Hens. *Poult. Sci.*, 83, 889-894.
- MASTIKA, M. et CUMMING, R.B. 1987. Effects of previous experience and environmental variations on the performance and pattern of feed intake of choice fed and complete fed broiler. Microbiology and nutrition. In: D. J. Farrel (éd.) Recent Advances in Animal Nutrition in Australia. University of New England, Australia.
- McDONALD, M.W., 1978. Feed intake of laying hens. *World Poult. Sci. J.*, 34, 209-221.
- MEUNIER-SALAÜN, M.C. et FAURE, J.M. 1984. On the feeding and social behaviour of the laying hen. *Applied Animal Behaviour Science*, 129-141.
- MOHAN RAVI KUMAR, V. REDDY, V.R., REDDY, P.V.V.V.S.N. et SUDHAKARA, R. 1991. Utilisation of pearl millet (*Pennisetum typhoides*) for egg production. *Br. Poult. Sci.*, 32(3), 463-469.
- MOHITI-ASLI, M., SHIVAZAD, M., ZAGHARI, M., REZAIAN, M., AMINZADEH, S. et MATEOS, G.G. 2012: Effects of feeding regimen, fiber inclusion, and crude protein content of the diet on performance and egg quality and hatchability of eggs of broiler breeder hens. *Poult. Sci.*, 91, 3097-3106.
- MOORTHY, M., VISWANATHAN, K. 2010. Digestibility and feeding value of coconut meal for white leghorn layers. *Tamilnadu J. Vet. Anim. Sci.*, 6 (5), 196-203.
- MUSHARAF, N.A. et LATSHAW, J.D. 1999. Heat increment as affected by protein and amino acid nutrition. *World's Poult. Sci. J.*, 55, 233- 240.

N

- NAGALAKSHMI, D., RAMA RAO, S.V., PANDA, A.K. et SASTRY, V.R.B. 2007. Cottonseed meal in poultry diets: a review. *The Journal of Poultry Science* 44, 119-134.
- NICHELMANN M. et TZSCHENTKE, B. 2002. Ontogeny of thermoregulation in precocial birds. *Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integr. Physiol.*, 131(4), 751-63.
- NIR I., SHEFET G. et AARONI Y. 1994. Effect of particle size on performance. 1. Corn. *Poult. Sci.*, 73, 45-49.
- NOIROT, V., BOUVAREL, I., BARRIER-GUILLOT, B., CASTAING, J., ZWICK, J.L. et PICARD, M. 1998. Céréales entières pour les poulets de chair : le retour ? *INRA Prod. Anim.*, 11(5), 349-357.

NWOKORO, S.O. et EKHOSUEHI, E.I. 2005. Effect of replacement of maize with cassava peel in cockerel diets on performance and carcass characteristics. *Trop. Anim. Health Prod.*, 37 (6), 495-501.

O

OCDE/FAO 2014. Vue d'ensemble des perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2014-2023. In : OCDE (éd.), *Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2014*. Rome : FAO, 2014, 127 p. (Consulté le 15/09/2014). DOI:10.1787/agr_outlook-2014-4-fr.

OCDE/FAO 2014. Graines oléagineuses et produits dérivés. In : OCDE (éd.), *Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2014*. Rome : FAO, 2014, 15 p. (Consulté le 16/09/2014]. DOI:10.1787/agr_outlook-2014-8-fr.

OSEI, S.A. 1992. Sun-dried cassava peel meal as a feed ingredient in broiler diets. *Trop. Agric. (Trinidad)*, 69 (3), 273 – 275.

P

PEGURI, A. et COON, C. 1991: Effect of temperature and dietary energy on layer performance. *Poult. Sci.* 70, 126-138.

PHILIPPS, C.J.C. 2005. Meta-analysis – a systematic and quantitative review of animal experiments to maximize the information derived. *Animal Welfare*, 14, 333-338.

PICARD M., 1985. Heat effects on the laying hen. Protein nutrition and food intake. In: *Proc. 5th Europ. Symp. Poult. Nut.*, 27-31/10/1985, Maale Hachamisha (Israel), 65-72.

PICARD, M., SAUVEUR, B., FENARDJI, F., ANGULO, I. et MONGIN, P. 1993. Ajustements technico-économiques possibles de l'alimentation des volailles dans les pays chauds. *INRA Prod. Anim.*, 6(2), 87-103.

PICARD, M., MELCION, J.P., BOUCHOT, C. et FAURE J.M., 1997. Picorage et préhensibilité des particules alimentaires chez les volailles. *INRA Prod. Anim.*, 10, 403-414.

PICARD, M., Le FUR, C., MELCION, J.P. et BOUCHOT, C., 2000. Caractéristiques granulométriques de l'aliment : le «point de vue» (et de toucher) des volailles. *INRA Prod. Anim.*, 13, 117-130.

PRESTON, G. M., MCCracken, K. J., et McAllister, A. 2000. Effect of diet form and enzyme supplementation on growth, efficiency and energy utilization of wheat-based diets for broilers. *Brit. Poult. Sci.*, 41, 324-331.

Q

QUENTIN M., BOUVAREL I., BERRI C., LE BIHAN- DUVAL E., BAEZA E., JEGO Y., et PICARD M. 2003. Growth, carcass composition and meat quality response to dietary concentrations in fast-, medium- and slow-growing commercial broilers. *Anim. Res.*, 52, 65-77.

QUENTIN M., BOUVAREL I. et PICARD M., 2004. Short and long term effects of feed form on fast- and slow-growing broilers. *J. Appl. Poult. Res.*, 13, 540-548.

R

RAE, V. et NGAYA, R. 2010. Trends in consumption, production, and trade in livestock and livestock products. In : STEINFELD, H., MOONEY, H.A., SCHNEIDER, F. and NEVILLE, L.E. (éd.), *Livestock in a changing landscape: Drivers, consequences and responses, Vol 1*. Rome : FAO, 2010, 450 p. (Consulté le 8/082014). www.fao.org/publications.

RAMA RAO, S.V., REDDY, M.R., PRAHARAJ, N.K. et SHYAM SUNDER, G. 2000. Laying performance of broiler breeder chickens fed various millets or broken rice as a source of energy at a constant nutrient intake. *Trop. Anim. Health Prod.*, 32, 329–338.

RAVIDRAN, V. 2013a. Main ingredients used in poultry feed formulations. In : FAO (éd.), *Poultry development review*. Rome : FAO, 2013, 127 p. (Consulté le 8/082014). www.fao.org/publications.

RAVIDRAN, V. 2013b. Alternative feedstuffs for use in poultry feed formulations. In : FAO (éd.), *Poultry development review*. Rome : FAO, 2013, 127 p. (Consulté le 8/082014). www.fao.org/publications.

RENAUDEAU, D., COLLIN, A., YAHAV, S., DE BASILIO, V., GOURDINE, J. L. et COLLIER, R. J. 2012. Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. *Anim.*, 6: 707-728.

ROBINSON, D. 1985. Performance of laying hens as affected by split time and split composition dietary regimens using ground and unground cereals. *Brit. Poult. Sci.* 26, 299- 309.

ROGERS, P.J. 1995. The development of the brain and behaviour in the chicken, CAB Int., Wallingford, UK, 95-110.

ROSE, S.P. et LAMBIE, I.T.M. 1986. Comparison of a choice feeding regime for broilers under continuous and intermittent lighting programmes. *7e Conférence Européenne d'Aviculture, WPSA Branche française, St Cyr sur Loire (FRA)*, vol 2, 903-904.

ROSE, S.P., FIELDEN, M., FOOTE, W.R. et GARDIN, P. 1995. Sequential feeding of whole wheat to growing broiler chickens. *Br. Poult. Sci.*, 36, 97-111.

ROSEBROUGH, R.W., MCMURTRY, J.P. et STEELE, N.C. 1989. Protein and energy relations in the broiler chicken. *Brit. J. Nut.*, 61, 223-233.

S

SABINO, H.F.N. 2001. Determinação do nível proteico da dieta para frangos de corte em crescimento. [Monografia]. Jaboticabal (SP): Universidade Estadual Paulista; 2001.

SAFAA, H.M., JIMENEZ-MORENO, E., VALENCIA, D.G., FRIKHA, M., SERRANO, M.P. et MATEOS, G.G. 2009. Effect of main cereal of the diet and particle size of the cereal on

- productive performance and egg quality of brown egg-laying hens in early phase of production. *Poult. Sci.*, 88(3), 608-614.
- SAHIN, K., et KUCUK, O. 2001. A simple way to reduce heat stress in laying hens as judged by egg laying, body weight gain and biochemical parameters. *Acta Veterinaria Hungarica*, 49: 421-430
- SAKOMURA, N.K. 1998. Influência da temperatura ambiente sobre a exigência nutricional de aves (frangos de corte, matrizes e galinhas de postura). In: *Simpósio Internacional Sobre Instalações e Ambiência, Campinas, São Paulo, Brasil*, 1998, p. 267-293.
- SAUVANT, D., SCHMIDELY, P. et DAUDIN, J.J. Les méta-analyses des données expérimentales : applications en nutrition animale. *INRA Prod. Anim.*, 18(1), 63-73.
- SAUVANT, D., SCHMIDELY, P., DAUDIN, J.J. et ST-PIERRE, N.R. 2008. Meta-analyses of experimental data in animal nutrition. *Animal* 2, 1203–1214.
- SCHOLTYSSSEK, S., SEEMANN, M. et SEEMANN, G. 1983. Mastleistung und Schlachtkörperqualität nach Wahlfütterung von Broilern (I. Mitteilung). *Arch. Geflügelk.*, 47, 166-174.
- SELLE, P.H., CADOGAN, D.J., LI X. et BRYDEN, W.L. 2010. Review: Implications of sorghum in broiler chicken nutrition. *Anim. Feed Sci. Tech.*, 156, 57–74.
- SINURAT, A.P. et BALNAVE, D. 1986. Free-choice feeding of broilers at high temperatures. *Brit. Poult. Sci.* 27:577–584.
- SMITH, A.J. et OLIVER, J. 1972. Some nutritional problem associated with egg production at high environmental temperatures. 4. The effect of prolonged exposure to high environmental temperatures on the productivity of pullets fed on high energy diets. *Rhodesian Journal of Agricultural Research*, 10, 43–60.
- SUMMERS, J. D. et LEESON, S. 1993. Influence of diets varying in nutrient density on the development and reproductive-performance of white leghorn pullets. *Poult. Sci.* 72, 1500-1509.
- SUNDU, D., KUMAR, A. et DINGLE, J. 2006. Response of broiler chicks fed increasing levels of copra meal and enzymes. *Int. J. Poult. Sci.*, 5 (1), 13-18.
- SYAFWAN, S., WERMINK, G.J.D., KWAKKEL, R.P. et VERSTEGEN, M.W.A. 2012: Dietary self-selection by broilers at normal and high temperature changes feed intake behavior, nutrient intake, and performance. *Poult. Sci.* 91, 537-549.

T

- TASAKI, I. et KUSHIMA, M. 1979. Heat production when single nutrients are given to fasted cockerels. Cambridge Mount L.E. (éd.), *Proc. 8th Energy Metabolism Symp.*, sept 1979, EAAP Publ. n°26, 253-256.
- TEMIM, S., CHAGNEAU, A.M., GUILLAUMIN, S., MICHEL, J., PERESSON, R., GERAERT, P.A. et TESSERAUD S. 1999. Effects of chronic heat exposure and protein intake on growth performance, nitrogen retention and muscle development in broiler chickens. *Reproduction*

Nutrition Development, 39, 145–156.

- TEMIM, S., CHAGNEAU, A.M., PERESSON, R. et TESSERAUD S. 2000. Chronic heat exposure alters protein turnover of three different skeletal muscles in finishing broiler chickens fed 20 or 25% protein diets. *J. Nutr.*, 130, 813–819.
- TRAINEAU, M., BOUVAREL, I., MULSANT, C., ROFFIDAL, L., LAUNAY, C. et LESCOAT, P. 2013. Effects on performance of ground wheat and with or without insoluble fiber or whole wheat in sequential feeding for laying hens. *Poult. Sci.*, 92, 2475-2486.
- TRAINEAU, M., BOUVAREL, I., MULSANT, C., ROFFIDAL, L., LAUNAY, C. et LESCOAT, P. 2014. Modulation of energy and protein supplies in sequential feeding in laying hens. *Animal*, doi:10.1017/S1751731114002092.
- TRAINEAU, M. *Détermination du champ d'application du système d'alimentation séquentielle chez les poules pondeuses*. Thèse de Doctorat, Université François Rabelais, Tours, Avril 2014, 196 p.
- TRAVEL, A., NYS, Y. et LOPES, E. 2010. Facteurs physiologiques et environnementaux influençant la production et la qualité de l'œuf. *INRA Prod. Anim.*, 23, 155–166.
- TROMPIZ, J., VENTURA, M., ESPARZA, D., ALVARADO, E., BETANCOURT, E. et PADRON-MORALES, S. 2002. Evaluation of partial substitution of feed concentrate for bean grain meal (*Vigna unguiculata*) in broiler feeding. *Revista Científica*, Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad del Zulia, 12 (Suplemento 2): 478-480.
- TULEUN, C.D. et IGBA, F. 2008. Growth and carcass characteristics of broiler chickens fed water soaked and cooked velvet bean (*Mucuna utilis*) meal. *Afr. J. Biotech.*, 7(15), 2676-2681.
- TULEUN, C.D., CAREW, S.N. et AJIJI, I. 2008. Feeding value of velvet beans (*Mucuna utilis*) for laying hens. *Livest. Res. Rural Dev.*, 20 (5).

U

- UDEDIBIE, A.B.I., NWAIWU, J., MADUBUIKE, E.N., NKWOCHA, C.O. et IMO, I.O. 1988. Jackbean (*Canavalia ensiformis*): poison turned to good protein feed. Owerri, Nigeria, Federal University of Technology.
- UMAR FARUK, M. *L'évaluation de l'alimentation mélangée et séquentielle à base de matières premières localement disponibles sur les performances des poules pondeuses en France et au Nigéria*. Thèse de Doctorat, Université François Rabelais, Tours, Août 2010, 200 p.
- UMAR FARUK, M., LESCOAT, P., BOUVAREL, I., NYS, Y. et TUKUR, H. M. 2010a. Use of whole millet (*Pennisetum glaucum*) and protein–mineral concentrate in poultry feeding is an efficient feed management method in Nigeria. XIII European Poultry Conference, 24–27 August 2010, Tours, France.
- UMAR FARUK, M., BOUVAREL, I., MÊME, N., RIDEAU, N., ROFFIDAL, L., TUKUR, H. M., BASTIANELLI, D., NYS, Y. et LESCOAT, P. 2010b. Sequential feeding using whole wheat and

a separate protein-mineral concentrate improved feed efficiency in laying hens. *Poult. Sci.*, 89: 785–796.

UMAR FARUK, M., BOUVAREL, I., MÊME, N., ROFFIDAL, L., TUKUR, H. M., NYS, Y. et LESCOAT, P. 2010c. Adaptation of wheat and protein-mineral concentrate intakes by individual hens fed ad libitum in sequential or in loose-mix systems. *British Poultry Science*, **51**: 811-820.

UMAR FARUK, M., BOUVAREL, I., MALLET, S., ALI, M. N., TUKUR, H. M., NYS, Y. et LESCOAT, P. 2011. Is sequential feeding of whole wheat more efficient than ground wheat in laying hens? *Anim.*, **5**, 230-238.

USMAN BABA, H. 2012. *Utilization of sorghum in the diets of laying hens using different energy levels and feeding systems*. Thèse de Doctorat, Université Usmanu Danfodiyo, Sokoto, Nigéria, Décembre 2012, 155 pages.

V

van MILGEN, J., GLOAGUEN, M., Le FLOC'H, N., BROSSARD, L., PRIMOT, Y. et CORRENT, E. 2012. Meta-analysis of the response of growing pigs to the isoleucine concentration in the diet. *Anim.*, **6**(10), 1601-1608.

W

WATKINS, S.E., SKINNER J.T., ADAMS M.H. et WALDROUP P.W. 1993. An evaluation of low-gossypol cottonseed meal in diets for broiler chickens 1. Effect of cottonseed meal level and lysine supplementation. *Journal of Applied Poultry Research*, **2**, 221-226.

WILSON, B.J. et McNAB, J.M. 1975. The nutritive value of triticale and rye in broiler diets containing field beans (*Vicia faba* L.). *Brit. Poult. Sci.* **16**, 17–22.

WOODS, S.C., SEELY, R.J., PORTE, D.J. et SCHWARTZ, M.W. 1998. Signals that regulate food intake and energy homeostasis. *Science*, **280**, 1378-1383.

Y

YAHAV, S. 2009. Alleviating heat stress in domestic fowl : different strategies. *World's Poult. Sci. J.*, **65**, 719-732.

YAHAV, S., SHINDER, D., RUZAL, M., GILOH, M. et PIETSUN, Y. 2009. Controlling body temperature – The opportunities for highly productive domestic fowl. In : CISNEROS A. B. et GOINS B. L. (éds). *Body temperature regulation*. Nova Science Publishers, Inc., pp 65-98.

YO, T., PICARD, M., GUERIN, H. et DAUVILLIERS, P. 1995. Alimentation séparée (céréales graines entières + aliment complémentaire granulé + coquilles d'huîtres) des poulettes et des poules pondeuses en climat chaud. *Revue Elev. Méd. vét. Pays trop.*, **48**, 67-76.

YO, T., SIEGEL, P.B., GUERIN, H. et PICARD, M. 1997. Self-selection of dietary protein and energy by broilers grown under a tropical climate: Effect of feed particle size on the feed choice. *Poult. Sci.* 76, 1467-1473.

YO, T., SIEGEL, P., FAURE, J.M. et PICARD, M. 1998. Self selection of dietary protein and energy by broilers grown under a tropical climate : adaptation when exposed to choice feeding at different ages. *Poult. Sci.*, 77, 502-508.

Z

ZHANG, Y. et PARSONS, C.M. 1996. Effects of overprocessing on the nutritional quality of peanut meal. *Poult. Sci.*, 75, 514–518.

Systèmes d'alimentation alternatifs pour le développement des filières volailles en régions chaudes

Résumé

L'objectif de ce travail était d'évaluer, les possibilités de diversification des matières premières utilisées en alimentation de la volaille et les conditions d'application des systèmes d'alimentation séquentielle et mélangée en milieu chaud. Une méta-analyse et deux expérimentations *in vivo* ont permis de conclure qu'il est possible de combiner sorgho/tourteau de coton et millet/sorgho dans l'aliment du poulet sans effet synergique sur les performances. Chez la poule pondeuse, une étude réalisée en milieu chaud et humide a permis de montrer que lorsque l'animal est soumis à des conditions thermiques et hygrométriques variables, les performances de production des poules en alimentation séquentielle et mélangée sont fortement affectées. En température chaude et constante, les poules en alimentation séquentielle ont une meilleure efficacité alimentaire que les poules en alimentation classique.

Ce travail a permis de mettre en place des systèmes d'alimentation permettant de mieux valoriser des matières premières locales et d'améliorer l'ajustement des apports aux besoins des animaux. Les modèles présentés permettent ainsi de renforcer les liens entre filières avicole et végétale et de contribuer à leur développement.

Mots-clés : poule pondeuse, tropical, poulet de chair, systèmes d'alimentation, matières premières

Résumé en anglais

The objective of this work was to evaluate the impact of alternative feed ingredients in poultry feeding and to determine bird's responses to sequential and loose-mix feeding in hot climate. A meta-analysis and *in vivo* trials were performed on the use of millet, sorghum and cottonseed meal in poultry diets. Results showed that simple or combined utilization of these ingredients resulted in similar feed intake and growth performance as corn/soybean-based diets. In laying hens, a study conducted in warm conditions showed that when they are subjected to variable temperature and humidity throughout and within a day, laying and growth performance decreased in sequential and loose-mix feeding. A second study confirmed that high environmental temperature does not disable sequential feeding benefits.

This work suggest feeding systems in which feed ingredients produced in hot climates could be directly included in birds diets have been proposed. This will thereby help consolidating the links between poultry and vegetable supply chains and contribute to their development.

Keywords: laying hen, broiler, tropical, feeding systems, feed ingredients