



HAL
open science

Caractériser la valeur nutritionnelle des aliments par des méthodes innovantes de mesure de la digestibilité pour une aviculture durable

Maria Vilariño, Jean-Paul Métayer, Brigitte Mahaut, Isabelle Bouvarel, Philippe Lescoat, Pascal P. Chartrin, Yann Fournis, Patrick Hogrel, Laurent Bonnal, Denis Bastianelli

► To cite this version:

Maria Vilariño, Jean-Paul Métayer, Brigitte Mahaut, Isabelle Bouvarel, Philippe Lescoat, et al.. Caractériser la valeur nutritionnelle des aliments par des méthodes innovantes de mesure de la digestibilité pour une aviculture durable. *Innovations Agronomiques*, 2016, 49, pp.163-177. 10.15454/1.4622755719189011E12. hal-01652934

HAL Id: hal-01652934

<https://hal.science/hal-01652934>

Submitted on 30 Nov 2017

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Caractériser la valeur nutritionnelle des aliments par des méthodes innovantes de mesure de la digestibilité pour une aviculture durable

Vilarino M.¹, Métayer J.-P.², Mahaut B.², Bouvarel I.³, Lescoat P.^{4*}, Chartrin P.⁴, Fournis Y.⁵, Hogrel P.⁵, Bonnal L.⁶, Bastianelli D.⁶

avec la contribution de Coulibaly Ibrahim, Couty Michel, Tonnac Auriane, Mika Amandine, Aubert Sandra, Juin Hervé.

¹ARVALIS - Institut du végétal, Pouline, 41100 Villerable, France

²ARVALIS - Institut du végétal, 91720 Boigneville, France

³ITAVI, Centre INRA de Tours, 37380 Nouzilly, France

⁴Unité de recherches avicoles, Centre INRA de Tours, 37380 Nouzilly, France

^{4*} (adresse actuelle) AgroParisTech, 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05

⁵PROVIMI Firme-Service, Parc d'activités de Ferchaud, 35320 Crévin, France

⁶CIRAD-SELMET, Baillarguet TAC-112/A, 34398 Montpellier Cedex 05, France

Correspondance : m.vilarino@arvalisinstitutduvegetal.fr

Résumé

Le projet DigSPIR a permis d'avancer sur deux axes majeurs pour la filière avicole : la simplification méthodologique de la détermination de la digestibilité des aliments et la faisabilité du développement de ces mesures dans les élevages, cela en s'appuyant sur un outil de mesure simple et rapide comme la spectroscopie dans le proche infra-rouge (SPIR). Pour atteindre ces objectifs, une « base de données initiale » a été constituée à partir des échantillons de fientes et d'aliments provenant d'essais de digestibilité réalisés par les partenaires entre 1997 et 2011 et les données de digestibilité correspondantes. A partir de ces échantillons une base spectrale a été générée et les premières calibrations développées. Puis, cinq essais de digestibilité ont permis d'élargir la base spectrale (différents aliments, niveaux nutritionnels et âges, sexes mélangés, ajout d'enzymes ...), d'améliorer les calibrations et d'aboutir à une méthode simplifiée. Ils ont également apporté des nouvelles connaissances sur les facteurs de variation de la digestibilité. Les prédictions des composants des fientes sont très bien corrélées avec les valeurs de référence, en particulier pour l'énergie brute, l'amidon ou l'azote total. En combinant l'information des spectres de l'aliment et des fientes, la prédiction de la digestibilité de l'énergie est largement améliorée (R^2 de 0,94 et 56 kcal/kg MS d'erreur, soit moins de 2 % de la valeur énergétique d'un aliment). L'étude de faisabilité réalisée en élevage de poulets de chair a montré une bonne cohérence des prédictions en comparaison avec les résultats en station expérimentale, ce qui encourage à suivre cette voie et enrichir la base de calibration avec des données issues du terrain.

Mots-clés : digestibilité, spectrométrie proche infrarouge, poulet, alimentation, élevage de précision

Abstract : Characterizing the nutritional value of feed through innovative methods of measuring digestibility for sustainable poultry

The project entitled "DigSPIR" made it possible to progress on two main lines of research for the poultry industry: the methodological simplification of the assessment of feed digestibility and the feasibility of developing these measures in farms, with the use of a simple and fast tool as the near infrared spectroscopy. To reach these objectives, an "initial database" was designed from the analytical results on excreta and feed samples, and the digestibility values, obtained from previous experiments made by the partners from 1997 to 2011. The spectra allowed to create a new database and to get the first

calibrations of prediction. Five trials with digestibility measures enabled to enlarge the spectral database (different feeds, nutritional levels and ages, both sex, adding enzymes ...), to improve the calibrations and to result in a simplified method. These trials led also to new knowledge about variation factors of digestibility. The predictions of the composition of excreta were well correlated with the analytical reference values and especially for gross energy, starch and nitrogen. In combining the spectral information of feed and of excreta, the prediction of the energy digestibility is widely improved ($R^2=0.94$ and error of 56 kcal/kg DM, or less than 2 % of feed energetic value). The study of feasibility made in poultry farms, showed a good consistency between predictions and *in vivo* results. These results encourage to follow this track and to enlarge the calibration database with measures in farms.

Keywords: digestibility, near infrared spectroscopy, chicken, feed, precision farming

Introduction

Avec 1,85 Mt produites en France, la viande de volaille constitue la seconde production française de viande derrière le porc ; elle représente près de 30 % de la production de viande en volume. La filière volailles de chair génère environ 60 000 emplois directs. Cependant, les principaux indicateurs économiques montrent que depuis la fin des années 1990, l'aviculture française connaît une crise structurelle qui se traduit notamment par un recul de 20 % des volumes de volailles de chair produits sur la dernière décennie (Jez et al., 2009). Le principal enjeu pour les filières avicoles françaises est l'amélioration de sa compétitivité, face à la concurrence des producteurs émergents, et donc la pérennité de l'activité avicole, tout en respectant l'environnement et le bien-être animal.

L'aliment représente un facteur particulièrement déterminant des résultats technico-économiques, mais aussi des rejets dans l'environnement et du bien-être animal. Différents travaux portent sur l'évaluation des besoins nutritionnels (Quentin et al., 2004) et sur l'influence de l'alimentation sur les rejets des animaux (Leclercq, 1996 ; CORPEN, 2007). Un des pas les plus importants à faire pour la nutrition animale est de mieux connaître la digestibilité réelle des aliments en élevage. Cela optimisera les réponses des animaux, notamment face à l'apparition de matières premières issues de la fabrication de biocarburants, faisant appel à des process industriels variés impactant fortement leur valeur nutritionnelle (Vilariño et al., 2007 ; Métayer et al., 2009). Cela permettra de plus de réduire les rejets (azote, minéraux), les émissions gazeuses (ammoniac notamment) et leurs conséquences sur la santé des animaux (dermatites de contact, problèmes respiratoires). Les dermatites de contact sont très fréquentes en France, jusqu'à 85 % de lésions ulcéreuses observées par lot d'animaux (Allain et al., 2009). Or en juin 2010, la directive européenne relative à la protection des poulets de chair sera appliquée. Elle repose sur une obligation de résultats, et notamment au niveau de l'intégrité physique des animaux (pododermatites, ampoules du bréchet). Des solutions, dont celles relatives à l'alimentation, doivent être trouvées pour réduire ces lésions d'origine multifactorielle.

Pour le moment, la mesure de la digestibilité d'un aliment fait appel à des bilans digestifs *in vivo* qui ne représentent qu'une période limitée de la vie de l'animal (trois jours) et dans des conditions éloignées de l'élevage : mises à jeun des animaux, animaux en cages, caractéristiques nutritionnelles des aliments souvent déséquilibrées. La méthode de référence de mesure de la digestibilité des aliments (Bourdillon et al., 1990) repose sur l'utilisation d'animaux mis en bilan, avec des périodes successives d'alimentation, de jeûne et des collectes quantitatives des excreta. Un bilan classique se déroule ainsi sur un cycle de sept jours. A cette période expérimentale s'ajoutent des étapes de séchage des fientes, de broyage et d'analyses. Les résultats définitifs ne sont connus, dans le meilleur des cas, qu'après un délai de deux à quatre semaines. Une plus grande souplesse dans l'appréciation de la digestibilité de l'aliment est nécessaire pour prendre en compte les changements physiologiques liés à une croissance rapide et la réponse aux matières premières apportées. Une première évolution est l'utilisation de marqueurs (Péron et al., 2005), qui est un moyen de mesurer la digestibilité des aliments en

s'affranchissant de la mise à jeun et donnant la possibilité de mesurer la digestibilité à différents âges. Cependant, différents points restent lourds : la fabrication des aliments peut être contraignante ; certains marqueurs étant toxiques pour l'homme, des analyses de laboratoire supplémentaires sont nécessaires pour mesurer la proportion du marqueur dans les aliments et les fientes ; et enfin cette technique n'est pas envisageable en élevage.

Le développement de méthodes simplifiées issues du bilan digestif classique et accompagnées de l'utilisation d'un outil de mesure rapide pourrait permettre cette souplesse. La spectroscopie dans le proche infrarouge (SPIR) est dans ce cadre un outil prometteur. La SPIR est une technique analytique permettant de mesurer les propriétés d'échantillons à partir de leur spectre d'absorption de la lumière infrarouge. Cette technique est rapide et peu coûteuse, mais nécessite une calibration assez lourde à mettre en place car nécessitant un grand nombre de mesures de référence. La SPIR permet de mesurer la composition chimique des fientes (matière minérale, azote, amidon, énergie brute, etc.), avec une précision convenable, dans un certain nombre de conditions (Bastianelli et al., 2010). Cependant aucune calibration à portée universelle n'existe à ce jour. Au-delà de la composition chimique, des tests de calibration de la digestibilité de régimes ont été réalisés avec succès, en laboratoire (Bastianelli et al., 2007) mais sur une base de données restreinte. Cette approche existe déjà chez les ruminants (Decruyenaere et al., 2009), chez qui les mesures *in vivo* sont encore plus lourdes et le besoin de précision sensiblement moindre que chez les volailles.

Ainsi, le projet DigSPIR a réuni cinq partenaires : ARVALIS - Institut du végétal (Pilote), ITAVI, CIRAD, INRA-URA et PROVIMI, apportant les moyens humains et matériels essentiels :

- expérience préalable sur l'estimation de la digestibilité par SPIR dans un cadre expérimental,
- complémentarité dans l'expertise sur la digestibilité, l'alimentation, l'élevage,...
- bases de données conséquentes préexistantes de la digestibilité des aliments chez le poulet
- collection de fientes bien conservées avec des valeurs de référence disponibles
- moyens expérimentaux en station et sur le terrain.

Afin de travailler sur deux axes répondant aux besoins de la filière avicole :

- l'un sur la **simplification et l'amélioration de la méthodologie de mesure de la digestibilité des aliments chez le poulet** pour la recherche et développement, détermination des valeurs nutritionnelles des matières premières, des aliments et de leur lien avec les performances,
- **l'autre sur une utilisation à terme d'un outil de terrain** pour suivre en direct l'efficacité alimentaire, la santé digestive, les rejets dans l'environnement,... dans le cadre d'un élevage de précision.

Le développement de méthodes simplifiées de « bilan digestif » accompagné de l'utilisation d'une technique de mesure rapide comme la spectroscopie dans le proche infra-rouge (SPIR) étant dans ce cadre une voie prometteuse.

Pour répondre à ces besoins, le projet a été articulé en trois volets dont les objectifs étaient les suivants :

1. **prédire par spectroscopie dans le proche infrarouge (SPIR) la composition des fientes, puis directement la digestibilité des aliments;**
2. **passer de la méthode de bilan classique à une méthode simplifiée, utilisant la SPIR, pour évaluer la digestibilité des aliments dans des conditions plus proches du terrain;**
3. **évaluer en conditions d'élevage, la faisabilité de la méthode simplifiée et la précision des prédictions de la digestibilité par SPIR.**

La Figure 1 présente de manière schématique le lien entre les différents volets dans la constitution de la base de données utilisée pour développer les calibrations.

Figure 1. Schéma de la démarche suivie pour la constitution de la base de données de calibration.

- **Constitution d'une base de données « initiale »**
 - Homogénéisation et rassemblement des bases de données
 - Spectrométrie dans le Proche Infra Rouge (aliments et fientes)
 - ARVALIS, CIRAD, INRA = plus de 3000 couples spectres + données
 - Analyses de composition chimique complémentaires
 - MG, amidon, azote (total et Terpstra)
- **Essais *in vivo***
 - Elargissement de la BDD spectrale
 - Diversification des aliments (profils MP, niveaux nutritionnels)
 - Diversification des animaux (âges, sexe)
 - Diversification conditions d'élevage (régimes commerciaux, essais terrain)
 - Simplification des méthodes
 - Collecte totale ⇔ partielle (utilisation TiO₂ comme marqueur)
 - Mise à jeun ⇔ *ad-libitum*
 - Collecte fientes cages ⇔ sol ⇔ élevage
 - Individu ⇔ groupe
 - Fientes lyophilisées ⇔ séchées étuve ⇔ fraîches



1. Prédire par spectroscopie dans le proche infrarouge (SPIR) la composition des fientes, puis directement la digestibilité des aliments.

La digestion est un processus d'interaction entre un aliment et un animal. L'aliment possède des caractéristiques chimiques et physiques qui lui confèrent une digestibilité potentielle, tandis que l'animal l'utilisera plus ou moins efficacement selon son espèce, son potentiel génétique, son âge etc.

La prédiction de la digestibilité à partir d'informations provenant uniquement des aliments ne peut pas représenter l'ensemble du processus. Or, la plupart des équations disponibles pour prédire la valeur énergétique ou la digestibilité se base sur la composition chimique des aliments (Fisher et MacNab, 1987), ou leur spectre dans le cas des prédictions par spectrométrie dans le proche infrarouge (SPIR) (Valdes et Leeson, 1992).

Des essais de prédiction de la digestibilité par SPIR à partir des fientes ont été présentés plus récemment (Bastianelli et al., 2007). En effet, les fientes sont le résultat du processus de digestion, et contiennent donc des informations sur ce processus. Toutefois, on peut se demander si les résidus d'aliments non digérés contenus dans les fientes suffisent à apporter l'information contenue dans l'aliment sur la « digestibilité potentielle » de celui-ci.

1.1. Matériel et méthodes

La « base de données initiale » a été constituée à partir de collections d'échantillons de fientes provenant d'essais de digestibilité d'ARVALIS (51 essais), de l'INRA (36 essais) et du CIRAD (22 essais), réalisés les dernières années, pour lesquels les échantillons d'aliments correspondants étaient également conservés. Un total de 1015 échantillons de fientes correspondant à 84 aliments a été collecté. A cette base, ont été ajoutés 70 échantillons de fientes provenant de 18 régimes très contrastés testés dans le cadre du projet DIGSPIR (Métayer et al., 2013).

Les données de digestibilité sont des données obtenues par bilan classique sur des animaux âgés de trois semaines (Bourdillon et al., 1990). Parmi les 1085 échantillons de fientes traités, 974 comportaient une donnée de digestibilité de la matière sèche (MS), 940 l'énergie métabolisable (EMA), 545 la digestibilité des protéines et 277 la digestibilité de l'amidon.

Des analyses de référence complémentaires ont été faites et les échantillons de fientes lyophilisées et d'aliments ont tous été scannés sur un même spectromètre FOSS 6500. Pour chaque spectre de

fiente, le spectre de l'aliment correspondant a été associé, pour aboutir à un spectre concaténé comportant les deux signaux l'un après l'autre.

Les modèles de calibration ont été développés d'une part sur les spectres de fientes seuls ou d'aliments seuls, puis sur les deux spectres concaténés.

Le détail des dispositifs, des méthodes analytiques et statistiques ainsi que les résultats ont été publiés par Coulibaly et al. (2013).

1.2. Principaux résultats

1.2.1. Calibration par SPIR de la composition chimique de fientes.

Les résultats de ce volet ont permis de développer des modèles de calibration de la composition de fientes pour quatre critères (énergie, amidon, azote et matière grasse), avec de bons niveaux de précision par rapport aux méthodes de référence (Tableau 1).

Tableau 1. Prédiction par SPIR de la composition de fientes.

Paramètre	Moyenne	E.T.	Erreur SPIR	R ²
Energie brute (kcal/kgMS)	4100	310	43	0.98
Azote total (%MS)	5.1	1.2	0.3	0.96
Acide urique (%MS)	8.3	3.2	0.8	0.95
Amidon (%MS)	8.4	7.5	0.6	0.99
Matières grasses (%MS)	6.2	3.8	0.5	0.99

L'utilisation de la SPIR dans l'analyse de la composition chimique des fientes est déjà un résultat très utile dans les études de digestibilité. La prédiction simplifie le travail analytique et le rend sensiblement moins onéreux. Evaluer la digestibilité de plusieurs nutriments dans le même essai (énergie mais aussi amidon, protéines et matière grasse) de façon simultanée devient alors envisageable alors que cela était rarement fait par le passé du fait des coûts élevés que cela engendrait. Cependant, cela oblige néanmoins à réaliser des essais dans les conditions classiques ou avec marqueurs.

L'étape suivante était d'évaluer la « prédictibilité » par SPIR de la digestibilité de nutriments à partir de l'information spectrale contenue dans les fientes et les aliments.

1.2.2. Calibration par SPIR de la digestibilité de nutriments.

Le Tableau 2 montre les résultats de calibration de la digestibilité de la matière sèche, de l'amidon et de la protéine ainsi que de la valeur d'EMA.

Les calibrations basées sur les **spectres des aliments** ont des R² variant entre 0,33 et 0,76 et des erreurs de validation croisée élevées, même en tenant compte du fait qu'il s'agit de valeurs individuelles (moins précises que des valeurs moyennes de digestibilité habituellement présentées). Pour ces paramètres, l'information sur la digestibilité n'est clairement pas présente dans l'aliment, ou pour le moins dans le spectre proche infrarouge de celui-ci.

Les calibrations basées sur les **spectres des fientes** sont sensiblement meilleures pour la MS, les protéines et l'EMA mais les erreurs restent toutefois élevées. Au contraire, les performances de la calibration de la digestibilité de l'amidon sont très bonnes, avec un SECV de 0,74 % seulement correspondant à un R² de 0,96. Ceci signifie que les spectres des fientes contiennent beaucoup d'information sur la digestibilité de l'amidon. Ce résultat n'est pas surprenant car l'amidon retrouvé dans

les fientes vient seulement de l'amidon non digéré (contrairement à l'azote ou à l'énergie qui proviennent également des apports endogènes et métaboliques).

Tableau 2. Statistiques de calibration et de validation croisée pour les modèles construits à partir des spectres des aliments, des fientes, ou leur concaténation

	Spectres	N	Moy.	Et	R ²	SECV
Dig. MS (%)	Aliments	931	65,6	5,5	0,76	2,82
	Fientes	934	65,7	5,5	0,87	2,26
	Concaténation	937	65,6	5,6	0,95	1,35
Dig. Amidon (%)	Aliments	267	95,3	3,4	0,33	2,76
	Fientes	260	95,6	3,0	0,96	0,74
	Concaténation	270	94,9	4,1	0,98	0,68
Dig. Protéines (%)	Aliments	519	76,3	4,7	0,50	3,47
	Fientes	513	76,4	4,7	0,73	2,47
	Concaténation	525	76,4	4,7	0,75	2,50
EMA (kcal/kgMS)	Aliments	916	3323	239	0,74	127
	Fientes	891	3316	238	0,80	117
	Concaténation	882	3322	240	0,95	57

N : Nombre d'échantillons dans le modèle; Moy, Et.: moyenne, écart type, de la population d'étalonnage ; R² : coefficient de détermination de la calibration ; SECV : erreur type de validation croisée.

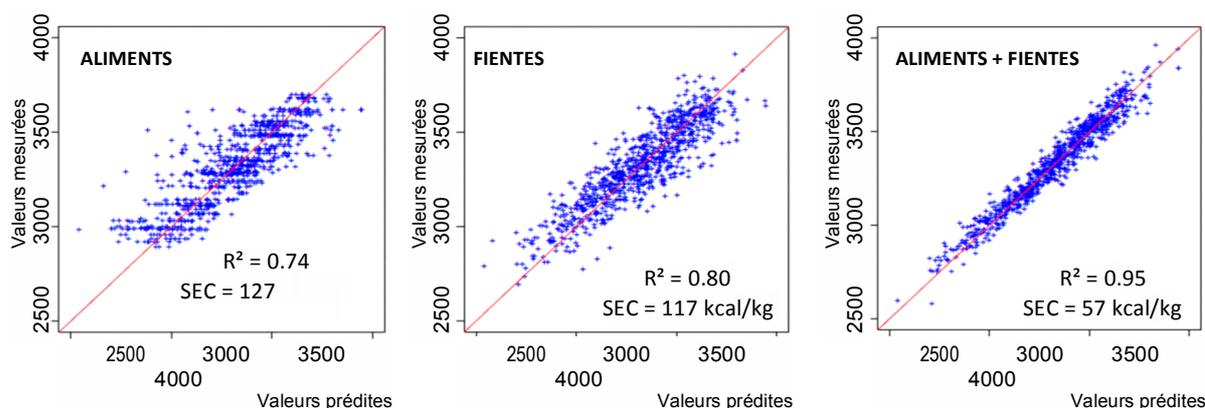
Les calibrations de digestibilité de la MS et d'EMA basées sur les **spectres concaténés** ont des erreurs SECV réduites de moitié par rapport aux calibrations basées seulement sur les fientes ou les aliments. La précision atteinte est de 1,35 % pour la digestibilité de la MS et de 57 kcal/kg d'EMA.

La Figure 2 illustre ce résultat, montrant la qualité de l'ajustement pour les prédictions de l'EMA par les spectres des fientes, des aliments ou de leur concaténation respectivement. En combinant l'information des spectres de l'aliment et des fientes (Figure 2), la prédiction de la digestibilité de l'énergie est largement améliorée et donne un R² de 0,95 avec une erreur SPIR de seulement 57 kcal/kg MS (soit moins de 2 % de la valeur énergétique d'un aliment).

Ces résultats montrent que les informations apportées par l'aliment d'une part et les fientes d'autre part ne sont pas redondantes, et qu'elles se complètent pour décrire la digestibilité. Ils confirment que la seule description de l'aliment ne peut rendre compte des variations du niveau énergétique, mais que le processus de digestion induit des variations en interaction avec l'aliment. En ce qui concerne la digestibilité de l'amidon, l'amélioration de la prédiction par les spectres concaténés est marginale. Les spectres de fientes seuls permettaient déjà une très bonne prédiction. Ceci confirme que l'information concernant la digestibilité de l'amidon se trouve essentiellement dans les fientes et que l'information provenant de l'aliment n'y ajoute quasiment rien.

La prédiction de la digestibilité des protéines n'est pas non plus améliorée par la prise en compte conjointe de l'information spectrale de l'aliment et des fientes. La performance obtenue reste modeste (2,5 %) ce qui signifie soit que les spectres des fientes et des aliments contiennent peu d'information sur la digestibilité de la protéine, soit que la mesure est plus imprécise que les autres paramètres de digestibilité, et donc plus difficilement « calibrable ».

Figure 2. Ajustement entre valeurs d'EMA (kcal/kg MS) mesurées et prédites par les modèles basés sur les spectres des fientes, des aliments ou leur concaténation.



2. Passer de la méthode de bilan classique à une méthode simplifiée, utilisant la SPIR, pour évaluer la digestibilité des aliments dans des conditions plus proches du terrain.

Plusieurs essais de digestibilité ont été réalisés dans le but principal d'élargir la base spectrale avec des aliments plus variés et conditions plus proches des élevages commerciaux (sexes mélangés, matières premières variées, niveaux nutritionnels divers, présence d'enzymes, différents âges, ...) et d'aboutir à des méthodes simplifiées. Ils ont également apporté quelques résultats ou des pistes dans la compréhension des facteurs de variation de la valeur nutritionnelle des aliments.

2.1. Matériel et méthodes

Sur l'ensemble des essais (Tableau 3), 51 aliments représentant une variabilité importante de profils matières premières (céréale majoritaire, tourteau majoritaire, type d'huile,..) ont été évalués. Du dioxyde de titane (TiO₂) a été introduit au taux de 0,50 % dans les aliments des essais 1 à 4 en tant que marqueur indigestible. Dans ces quatre essais, il n'a pas été ajouté d'additif anticoccidien et d'enzymes contrairement à l'essai 5. Les aliments étaient tous présentés en granulés.

Dans le 1^{er} essai, 18 aliments ont été étudiés avec deux niveaux d'énergie et des profils MP différents, à J24, âge habituel des bilans digestifs + ou - 3 jours. Des poulets mâles ont été utilisés. Au cours de cet essai, nous avons comparé les deux méthodes de bilan digestif, classique vs. marqueur.

Dans le 2^{ème} essai, nous avons testé des aliments comparables mais chez des femelles et à des âges différents, plage plus large (2 semaines).

Dans le 3^{ème} essai, six aliments de type croissance (avec des profils MP différents ont été comparés chez les mâles et les femelles).

Dans le 4^{ème} essai, un seul aliment à base de blé (choisi pour sa digestibilité plutôt variable) à des âges allant de J6 à J24.

Dans le 5^{ème} essai, huit aliments à base de blé ou maïs + plusieurs MRP et deux aliments commerciaux.

Le détail des dispositifs, des méthodes analytiques et statistiques ainsi que les résultats ont été publiés par Métayer et al (2015).

Tableau 3. Dispositifs expérimentaux des cinq essais réalisés en station expérimentale.

Essai	Céréales blé-maïs-orge- triticale	MRP pois-tourteau colza- tourteau tournesol- drêches	Huile colza-soja- tournesol	Age au bilan (jours)	Sexe
1	3 HE + 3 BE	4 HE + 4 BE	2 HE + 2 BE	J20, J24, J27	♂
2	3 HE + 3 BE	4 HE + 4 BE	2 HE + 2 BE	J15, J22, J29	♀
3	4	2	-	J24	♂♀
4	1	-	-	J6, J10, J15, J20, J24	♂♀
5	4 blé+MRP et 4 maïs+MRP + 2 aliments commerciaux			J24	♂♀

MRP = Matières Riches en Protéine ; HE = Type finition ; BE = type démarrage

2.2. Principaux résultats

L'essai 1 avait deux objectifs, d'abord l'obtention des valeurs de digestibilité à partir d'aliments très divers en termes de matières premières incorporées et niveaux nutritionnels, pour valider et enrichir la « base de données initiale » de calibration. Il avait également l'objectif d'avancer vers la simplification de la méthode de bilan digestif par une comparaison de la méthode de bilan classique (BiC = collecte totale des excréta avec mise à jeun en début et fin de bilan) avec une méthode par marqueur indigestible (BiM = TiO₂ incorporé à 0,5 % dans les aliments). Ces premiers résultats ont permis d'utiliser la méthode de marqueurs dans les autres essais en introduisant différentes variables.

2.2.1. Comparaison bilan classique (BiC) vs. bilan avec marqueur (BiM).

A partir du calcul de la digestibilité réalisé sur les mêmes animaux et les mêmes excréta, on n'observe aucune interaction entre la méthode BiC et BiM et le type d'aliment HE ou BE (Tableau 4).

Aucune différence significative n'est obtenue entre BiC et BiM sur les paramètres mesurés. La digestibilité de l'énergie (EMAn/EB) est en moyenne de 67,6 % vs. 67,0 % (NS), pour BiC et BiM. La digestibilité de l'amidon est de 95,5 vs. 95,9 % (NS), pour BiC et BiM. La digestibilité apparente de l'azote est de 80,5 % vs. 80,0 % (NS) pour BiC et BiM et la digestibilité de la matière grasse est de 85,2 % vs. 84,8 % (NS) pour BiC et BiM.

Tableau 4. Effet du type d'aliment et de la méthode de bilan sur la digestibilité des nutriments.

Méthode Type d'aliment	BiC		BiM		Effet type aliment	Effet méthode	Type aliment x méthode	ETR
	HE	BE	HE	BE				
EMAn (kcal/kg MS)	3267	3029	3247	2989	<0,001	NS	NS	88
EMAn/EB (%)	69,0	66,2	68,6	65,4	<0,001	NS	NS	2,7
CUDa N ¹ (%)	81,3	79,7	81,0	79,1	<0,001	NS	NS	3,0
CUDa N ² (%)	83,7	81,7	83,4	81,1	<0,001	NS	NS	3,0
CUD amidon (%)	94,6	96,4	94,5	96,3	<0,001	NS	NS	2,4
CUD MG (%)	88,3	82,1	88,1	81,6	<0,001	NS	NS	2,7

¹ : N = N total - N urique ; ² : N = N Terpstra

Bic = bilan classique ; BiM = bilan avec marqueur

HE = aliments Haute Energie ; BE = aliments Basse Energie

NS : P > 0,05

En conclusion, les deux méthodes sont comparables quel que soit le type d'aliment testé et leurs niveaux énergétiques.

La méthode avec marqueur permet par la suite de s'affranchir d'une mise à jeun de poulets et de mesures précises des quantités ingérées et excrétées, tout en permettant de mesurer les performances des animaux. Dans ce projet, il nous semblait intéressant d'utiliser une méthode avec marqueur, comme méthode de transition, entre celle de référence et la méthode simplifiée, car elle permet de réaliser plusieurs bilans à différents stades physiologiques des poulets au cours de la croissance. Elle s'est avérée fiable puisqu'on arrive à des taux de récupération du titane proches de 100 %.

2.2.2. Facteurs de variation de la digestibilité des nutriments chez le poulet

Pour faire une analyse multivariée de l'ensemble des résultats sur les variables explicatives de la variation des Coefficients d'utilisation digestive (CUD) de différents nutriments nous avons utilisé d'une part, la méthode dite de « segmentation » qui permet de diviser de façon progressive, par dichotomie, les données (variables qualitatives et quantitatives) en sous-groupes et d'autre part la méthode dite de « Random forests » pour identifier les variables explicatives (qualitatives et quantitatives), minimisant les erreurs de prédiction du CUD Energie, critère affecté par de multiples variables.

Le Tableau 5 montre les résultats obtenus par la méthode de segmentation, pour les CUD de quatre nutriments concernés. Nous ne présentons que les deux premiers niveaux de segmentation, bien que certains critères intéressants sortent plus tardivement.

Tableau 5. Segmentation des paramètres de digestibilités

Paramètres	1 ^{ère} segmentation		2 ^{ème} segmentation			
		Critère	Moy (n)	Critère	Moy (n)	
Amidon fientes 4,8 (546)	↙	Blé, pois	7,9 (156)	↘	Age J20-J29	9,2 (112)
				↘	Age J06-J15	4,8 (44)
	↘	Autres MP	3,6 (390)	↘	Mélange céréales	4,5 (150)
				↘	Maïs	3,0 (240)
CUDa N 83% (546)	↙	Essais 1-4	82 % (438)	↘	T. colza ≥ 4,5	79 % (141)
				↘	T. colza < 4,5	83 % (297)
	↘	Essai 5 (avec enzymes)	88 % (108)	↘	Base Blé	86 % (48)
				↘	Base maïs	89 % (60)
CUD MG 84% (546)	↙	MG alim < 4,8	69 % (36)	↘	CUD amidon ≤ 96	67 % (17)
				↘	CUD amidon > 96	71 % (19)
	↘	MG alim > 4,8	85 % (510)	↘	Céréales et huiles	83 % (306)
				↘	Maïs et essai 5	88 % (204)
CUD E 67% (546)	↙	CUDa N < 84	65 % (346)	↘	Amidon alt < 33	58 % (36)
				↘	Amidon alt ≥ 33	65 % (310)
	↘	CUDa N ≥ 84	71 % (200)	↘	MAT alt ≥ 20	69 % (123)
				↘	MAT alt < 20	73 % (77)

Moy : moyenne ; n : effectif du groupe considéré

La teneur en amidon des fientes est la première et presque unique variable explicative du **CUD amidon** ($R=0,96$; $P<0,001$). La méthode de segmentation est donc appliquée à la teneur en amidon des fientes. La première variable explicative des teneurs élevées en amidon dans les fientes (et donc d'un CUD dégradé) est le taux élevé de blé ou de pois dans l'aliment. Plus le taux d'incorporation du blé (choisi pour cette caractéristique) dans l'aliment est élevé, moins bien il est digéré ($R=-0,38$; $P<0,001$). Ces résultats corroborent ceux rapportés par Nugues et al. (2013) et Danel et al. (2015) avec des aliments à base de blé. Pour le pois, ces résultats sont en accord avec ceux de Carré et al. (2013), dans lesquels une baisse de la digestibilité de l'amidon a été observée avec l'introduction de pois dans l'aliment. La deuxième variable explicative pour ces aliments est l'âge des poulets. Les plus jeunes digèrent mieux

l'amidon des aliments à base de blé. Dans l'essai 4 (aliment base blé/soja), nous avons observé une baisse de 7,5 % ($P < 0,001$) du CUD amidon entre le 6^{ème} et le 24^{ème} jour d'âge des poulets et une variabilité individuelle qui augmente avec l'âge.

Dans cette étude, le premier niveau de segmentation du **CUDa N** est la variable « essai », l'essai 5 ayant de valeurs plus élevées que les quatre autres. Une différence qui pourrait expliquer ce résultat est la présence d'enzymes uniquement dans l'essai 5, sans qu'il soit possible de l'assurer. Au deuxième niveau, les variables explicatives sont, le type de céréale pour l'essai 5 et la présence ou non de tourteau de colza pour les quatre autres essais. Le CUDa N est corrélé positivement avec le taux d'incorporation de tourteau de soja ($R=0,49$) et négativement avec l'incorporation de tourteau de colza ($R=-0,44$). Ainsi, parmi les matières premières riches en protéines (MRP), plus la part de tourteau de soja est importante, meilleure est la digestibilité de l'azote des aliments. Inversement, un point de tourteau de colza dégrade le CUDa N de 0,3 % en moyenne.

Dans cette étude, la variabilité du **CUD MG** est plus difficile à expliquer. Le premier facteur explicatif est la teneur en matière grasse des aliments, avec une dégradation de la digestibilité pour les aliments les moins pourvus ($< 4,8$ % MG) mais cela concerne très peu d'individus (36 vs. 510). Sur ceux ayant plus de 4,8 % MG, la segmentation des données indique qu'en présence de maïs, le CUD MG est amélioré. Ensuite, la nature des huiles semble être un facteur important et en particulier l'incorporation d'huiles acides qui diminuerait le CUD MG de l'aliment. Tancharoenrat et al. (2013) attribuent une meilleure digestibilité iléale aux acides gras insaturés (AGI) ; or la part d'AGI (C18-2) est plus élevée dans l'huile de soja que dans l'huile de colza et l'huile acide (54,5 et 21,3 %) ce qui pourrait expliquer ce résultat.

Le **CUD Energie** est segmenté en premier lieu par le niveau du CUDa N ($<$ ou $>$ 84 %), qui se segmentent à leur tour par la teneur en amidon et la teneur en MAT respectivement. Tous types d'aliments confondus (5 essais), le CUD E est fortement corrélé avec le CUDa N ($R=0,79$; $P < 0,001$) et le CUD MG ($R=0,61$; $P < 0,001$). Les aliments moins riches en énergie, plus riches en cellulose brute, ont un CUD E plus faible ($R=0,50$; $P < 0,001$). Par contre, la corrélation avec le CUD amidon est plus faible ($R=0,33$; $P < 0,001$) sauf pour les aliments base blé A- (amidon moins digestible), qui montre une corrélation assez forte ($R=0,74$; $P < 0,001$). Si l'on considère les relations entre la digestibilité de l'énergie et celle des nutriments, on peut noter que le CUD E est un critère affecté par de multiples variables et de ce fait l'analyse est plus délicate.

La méthode des « random forest » nous a permis d'identifier les variables explicatives qualitatives et quantitatives, minimisant les erreurs de prédiction du CUD E, tel que présenté dans la Figure 3.

En conclusion, les principaux résultats indiquent que :

- la digestibilité de l'azote des aliments est dépendante de la nature des matières premières riches en protéines, avec un effet positif du tourteau de soja;
- la teneur en amidon des fientes permet de prédire précisément le CUD amidon. La présence de certains blés ou de pois peut dégrader le CUD amidon et ceci d'autant plus que l'animal est âgé;
- le CUD MG est amélioré en présence de maïs dans l'aliment, dégradé en présence d'huile acide;
- la digestibilité de l'énergie est fortement corrélée à la digestibilité de l'azote de l'aliment et à celle de l'amidon avec certains blés. Aucun effet significatif du sexe n'a été observé sur la digestibilité des nutriments.

Figure 3. Variables explicatives de la digestibilité de l'énergie (méthode « random forest »)



3. Évaluer en conditions d'élevage, la faisabilité de la méthode simplifiée et la précision des prédictions de la digestibilité par SPIR.

L'intérêt de la spectrométrie proche infrarouge (SPIR) pour estimer rapidement la digestibilité des aliments a été démontré dans les volets 1 et 2, pour des poulets élevés dans des conditions expérimentales. Dans l'objectif de rendre ces mesures applicables sur le terrain pour un pilotage plus fin de l'alimentation, une étude de faisabilité a été réalisée en élevages de poulets de chair.

La technique de prélèvement de fientes utilisée dans ces essais avait été établie au préalable par le partenaire industriel (Provimi).

Le détail des dispositifs, des méthodes analytiques et statistiques ainsi que les résultats ont été publiés par Bouvarel et al (2015).

3.1. Matériel et méthodes

Dans un premier essai, quatre élevages de poulets de chair (Ross PM3) recevant des aliments A (pour deux élevages) et B (pour les deux autres) ont fait l'objet de prélèvements d'aliments et de fientes au stade de finition, entre 28 et 32 jours d'âge. Les spectres des échantillons de fientes ont été pris, d'abord fraîches avec un appareil portatif directement dans l'élevage, puis séchées à l'étuve sur un spectromètre au laboratoire. Pour chaque spectre de fientes, le spectre de l'aliment correspondant a été associé, pour aboutir à un spectre concaténé comportant les deux signaux l'un après l'autre. La base de calibration développée dans le cadre du projet DIGSPIR (Coulibaly et al., 2013) a été utilisée pour prédire les valeurs de digestibilité. Les deux mêmes aliments A et B ont fait l'objet d'un bilan digestif classique avec mise à jeun et les valeurs de digestibilité prédites et mesurées ont été comparées.

Dans un deuxième essai, quatre élevages de poulets de chair (Ross PM3) ont été suivis lors de deux bandes successives de J9 à J28. Des fientes et des aliments ont été collectés pour chaque phase alimentaire et les performances de croissance de chaque bande ont été enregistrées et des prédictions de digestibilité par SPIR ont été effectuées sur 32 prélèvements réalisés en élevage.

3.2. Principaux résultats

3.2.1. Validité des mesures spectrales d'échantillons prélevés en élevage.

Le premier essai montre que pour une même forme d'échantillon (fientes séchées ou fraîches), les prédictions par SPIR paraissent cohérentes, d'une part, entre les deux élevages ayant reçu le même aliment et d'autre part, avec les résultats obtenus par bilan classique (Figure 4 – exemple de la valeur énergétique). Les prédictions par SPIR avec les fientes séchées apparaissent toutefois plus élevées que les valeurs obtenues par bilan classique et inversement avec les fientes fraîches. De plus, avec les fientes fraîches, la présence d'eau influence le spectre, et la qualité des mesures prédites est inférieure à celle obtenue sur fientes séchées.

3.2.2. Informations produites par la méthode SPIR en élevage.

Lors du deuxième essai en élevage, les valeurs de digestibilité prédites par SPIR ont été assez variables ; elles ont permis de différencier les phases d'élevage pour la digestibilité de l'amidon et de l'énergie, mais pas pour la matière grasse et l'azote. La mise en relation des prédictions d'EMA et les index de performance ($IP = (GMQ \times viabilité) / (IC \times 10)$) de chaque lot a permis d'observer une tendance des valeurs bases de la valeur énergétique mesurée par SPIR pour deux lots présentant les IP les plus faibles (D2 et B1) surtout au démarrage et en croissance (Figure 5), bien que ce ne soit que éléments préliminaires à confirmer.

En conclusion, ces résultats préliminaires sont encourageants, mais ont montré la nécessité d'enrichir la base de calibration avec une grande variété d'échantillons issus du terrain.

Figure 4. Comparaison des EMA (Kcal/ kg MS) obtenues par bilan classique (Références A et B) et les prédictions par SPIR pour les prélèvements A1, A2, B1 et B2 (fientes séchées et fraîches)

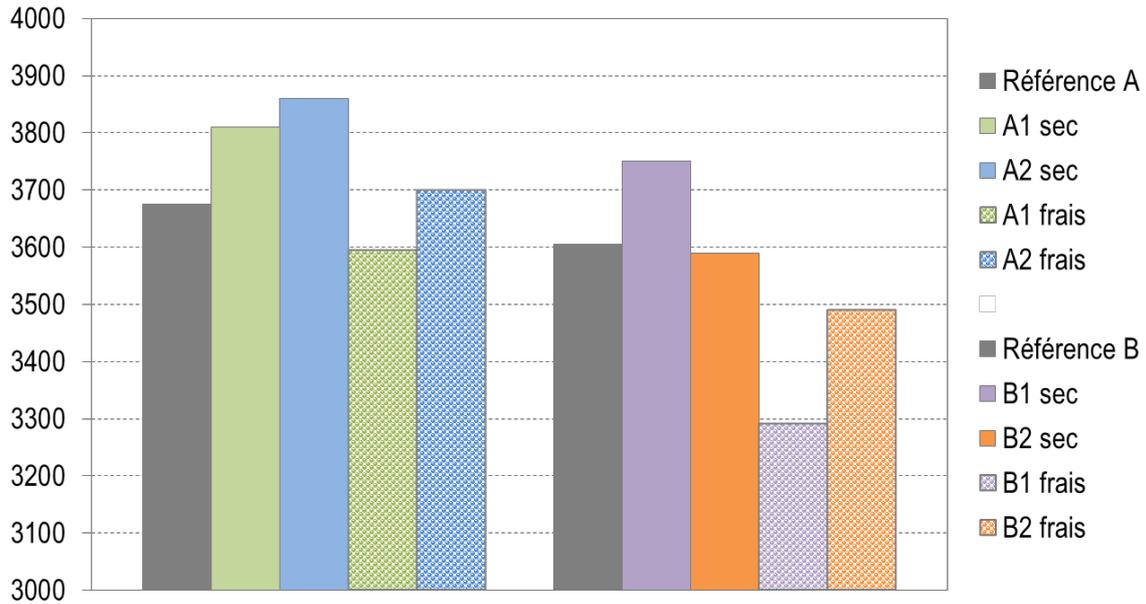
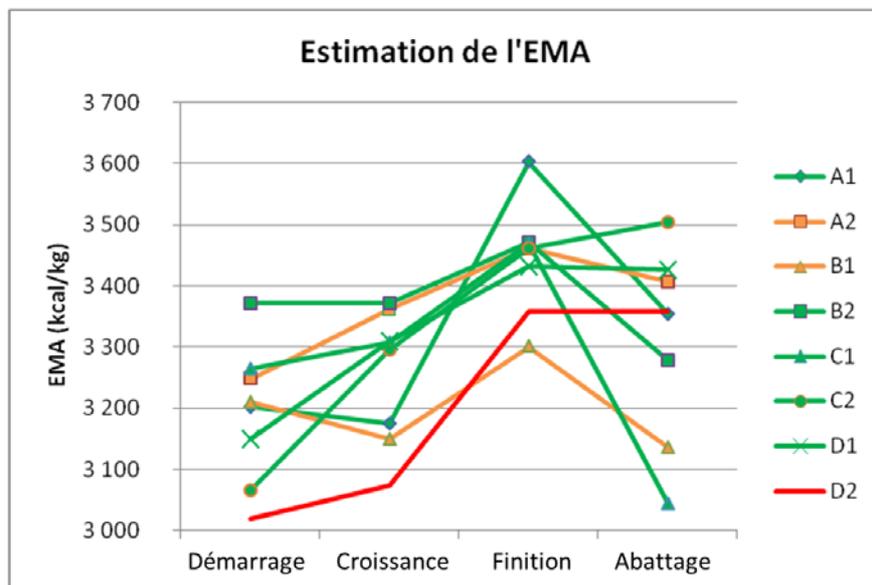


Figure 5. Prédiction de l'EMA par phase et par lot et Indice de Performance. Le niveau de performance est représenté par l'Index de Performance $IP = (GMQ \times viabilité) / (IC \times 10)$. En rouge, $IP = 265$; en orange, $IP = 290-292$; en vert $IP = 318-332$



Conclusions et Perspectives

La valeur ajoutée des résultats de ce projet peut se décliner à deux niveaux :

- **pour les travaux de Recherche et Développement** réalisés par les instituts techniques et de recherche ou par l'industrie de l'alimentation animale.

Les approches simplifiées proposées par le programme permettraient d'étudier plus facilement comment est valorisé l'aliment en fonction des individus et de leur milieu. Comme le suivi n'influence pas le comportement et la croissance normale de l'animal (pas de mise à jeun), des mesures continues

et multiples sont possibles. Les réactions digestives du poulet peuvent être étudiées au cours du temps y compris lors de transitions alimentaires.

L'utilisation de la SPIR dans l'analyse de la composition chimique des fientes est déjà très utile dans les études de digestibilité développées par les partenaires, afin de simplifier le travail analytique et de le rendre sensiblement moins onéreux. Evaluer la digestibilité de plusieurs nutriments (énergie, amidon, protéines et matière grasse) de façon simultanée devient alors envisageable alors que cela était rarement fait par le passé du fait des coûts élevés que cela engendrait.

Le seul coût analytique d'un essai de digestibilité classique (avec 8 aliments et 72 fientes) pour les quatre nutriments peut être divisé par 4 ou 5 avec l'utilisation de la SPIR pour prédire la composition chimique (en tenant compte des analyses nécessaires à la surveillance de calibration).

A un niveau plus avancé, c'est-à-dire pour la prédiction directe de la digestibilité de nutriments, les mesures précises des quantités ingérées et excrétées ne sont plus nécessaires. Le travail est ainsi simplifié et cela permettra à terme de réaliser des mesures en parquets ou en élevage et pas uniquement en cages, ce qui est le cas aujourd'hui.

Cette méthode intéresse beaucoup les généticiens pour intégrer des caractères liés à la meilleure digestion des animaux (phénotypage haut débit), et qui n'a pas aujourd'hui d'outils suffisamment rapides et économiquement satisfaisants.

➤ **pour la production** au niveau de la formulation et du suivi de l'élevage

Dans les élevages, il est assez souvent constaté des écarts de performances soudains, qui peuvent avoir un lien avec une baisse de digestibilité des aliments. Cela entraîne ainsi des rejets de matière organique (amidon, azote,..) plus importants qui peuvent, dans certaines conditions, dégrader la qualité de litières (humides, collantes, prolifération d'agents pathogènes,...) et poser des problèmes de bien-être animal. La baisse de performances, le développement de problèmes de pattes ou du bréchet ont un impact direct à l'abattoir (calibre, taux de saisies, rendements), avec des conséquences économiques pour les éleveurs et pour d'autres maillons de la filière.

Les bilans digestifs classiques étant inapplicables en conditions d'élevage, la méthode simplifiée à l'aide d'un outil rapide (SPIR) peut permettre de piloter la conduite de l'alimentation en continu, pour un « élevage de précision », à coupler avec d'autres outils de suivi d'élevage (boîtiers de régulation, sondes de mesure...). Il serait possible de suivre et maîtriser les performances, les rejets polluants, l'apparition des problèmes de malabsorption, etc. ou encore de savoir si les problèmes de performances sont liés ou non à l'aliment et/ou aux matières premières incorporées. La durée d'élevage des poulets standard n'étant que de 5-6 semaines, les actions correctives doivent être très rapides pour éviter des pertes conséquentes.

Un problème d'élevage qui réduirait la digestibilité des nutriments et donc la valeur énergétique de seulement 100 kcal/kg en moyenne sur l'ensemble de la période d'élevage (0-35j) augmenterait de 2 % la quantité d'aliment nécessaire pour produire un poulet, soit 1,6 tonne d'aliment supplémentaires pour une bande de 20 000 poulets.

Toutes ces utilisations contribuent directement ou indirectement à la triple performance : économique (moins d'aliment, de meilleures performances), environnementale (moins de rejets) et sociale (santé et bien-être des animaux, charge mentale pour l'éleveur). Néanmoins, cette utilisation nécessite encore un travail de recherche important pour développer de calibrations adaptées aux fientes récupérées en élevage.

En dehors de nos frontières, les méthodes mises au point pourraient également permettre aux pays en développement (mission du CIRAD) d'accéder à une évaluation plus facile de leurs ressources alimentaires.

Remerciements

Les auteurs remercient le personnel de la station expérimentale d'ARVALIS – Institut du végétal à Villerable (41) et à Boigneville (91), des stations INRA UR83 à Nouzilly (37) et UE1206 EASM au Magneraud (17), pour la fabrication d'aliments et la réalisation des essais sur animaux, les laboratoires d'ARVALIS, du CIRAD et de l'INRA UR83, pour la réalisation des analyses, Florent Duyme du service statistiques et méthodologies d'ARVALIS ainsi que les éleveurs participants. Ce projet a reçu l'aide financière du Compte d'Affectation Spécial « Développement Agricole et Rural » du Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du Territoire.

Références bibliographiques

- Allain V., Mirabito L., Arnould C., Colas M., Le Bouquin S., Lupo C., Michel V., 2009. Skin lesions in broiler chickens measured at the slaughterhouse: relationships between lesions and between their prevalence and rearing factors. *British Poultry Science* 50 (4), 407-417.
- Bastianelli D., Coulibaly I., Vilariño M., Chartrin P., Bouvarel I., Mahaut B., Hogrel P., Davrieux F., 2013. Combining spectra from feeds and feces for NIRS prediction of digestibility in poultry. In: IRSTEA. NIR 2013 Proceedings of 16th International Conference on Near Infrared Spectroscopy: Picking up good vibrations, La Grande-Motte, France, 2-7 June 2013. Montpellier, 677-680.
- Bastianelli D., Bonnal L., Juin H., Mignon-Grasteau S., Davrieux F., Carré B., 2010. Prediction of chemical composition of poultry excreta by near infrared spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 18, 69-77.
- Bastianelli D., Carré B., Mignon-Grasteau S., Bonnal L., Davrieux F., 2007. Proc. 12th Int. Conf. NIRS. Auckland (New Zealand), 9th-15th April 2005. Direct prediction of energy digestibility from poultry faeces using near infrared spectroscopy. NZ NIRS Soc. Inc., Hamilton (NZ), pp. 626-629.
- Bourdillon A., Carré B., Conan L., Francesch M., Fuentes M., Huyghebaert G., Jansen W.M.M.A., Leclercq B., Lessire M., Mc Nab J., Rigoni M., Wiseman J., 1990. European reference method of in vivo determination of metabolisable energy in poultry: reproductibility, effect of age, comparison with predicted values. *British Poultry Science* 31, 567-576.
- Bouvarel I., Fournis Y., de Tonnac A., Mika A., Couty M., Bonnal L., Juin H., Métayer J.-P., Vilariño M., Bastianelli D.. Apprécier la digestibilité des aliments en élevage de poulets de chair grâce au «proche infrarouge» : des premiers éléments de faisabilité. 11èmes Journ. Rech. Avicole, Tours, 25 et 26 mars 2015, pp. 808-812.
- Carré B., Lessire M., Juin H., 2013. Prediction of metabolisable energy value of broiler diets and water excretion from dietary chemical analyses. *Animal*, 7, 8, 1246-1258.
- CORPEN, 2007. Circulaire DPPR/SEI3/IP-07- 94 du 07/09/07 relative aux installations classées d'élevages de volailles - Utilisation de nouvelles références de rejets
- Coulibaly I., Métayer J.P., Chartrin P., Mahaut B., Bouvarel I., Hogrel P., Bastianelli D., 2013. La combinaison des informations issues des aliments et des fientes améliore la prédiction par SPIR de la digestibilité chez le poulet. 10èmes Journ. Rech. Avicoles et Palmipèdes à Foie Gras, La Rochelle, 26-28 mars, pp. 640-644.
- Danel J., Métayer J.P., Vilariño M., 2015. Variabilité de la digestibilité de l'amidon d'aliments à base de blé chez les poulets de chair : Effet de l'âge et du comportement alimentaire. 11èmes Journ. Rech. Avicole, Tours, 25 et 26 mars 2015, pp. 509-513.
- Decruyenaere V., Lecomte Ph., Demarquilly C., Aufrere J., Dardenne P., Stilmant D., Buldgen A. 2009. Evaluation of green forage intake and digestibility in ruminants using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS): Developing a global calibration. *Anim. Feed Sci. Technol.* 148, 138-156.
- Fisher C., Mc Nab J.M., 1987. Techniques for determining the metabolizable energy (ME) content of poultry feeds. In: Haresign W. et Cole D.J.A. (Eds.) *Recent Advances In Animal Nutrition*. Butterworth (London, UK), 3-18.
- Jez C., Beaumont C., Magdelaine P., Paillard S., 2009. La filière avicole française à l'horizon 2025. Rapport du groupe de travail Prospective avicole, octobre 2009, 89 p., Ed. INRA ITAVI.

Leclercq, B.; 1996. Les rejets azotés issus de l'aviculture : importance et progrès envisageables ; INRA Productions Animales, vol. 9 ; no. 2 ; 91-101.

Métayer J.P., Lescoat P., Bastianelli D., Bouvarel I., Fournis Y., Vilariño M., 2015. Facteurs de variation de la digestibilité des nutriments chez le poulet : synthèse des résultats du projet DIGSPIR. 11ème Journ. Rech. Avicole, Tours, 25 et 26 mars 2015, pp. 504-508.

Métayer J.P., Lescoat P., Bastianelli D., Bouvarel I., Fournis Y., Vilariño M., 2013. Comparaison entre une méthode de bilan digestif classique et une méthode avec marqueur chez le poulet standard : effet sur la digestibilité des nutriments des aliments. 10èmes Journ. Rech. Avicoles et Palmipèdes à Foie Gras, La Rochelle, 26-28 mars, pp. 767-771.

Métayer J.-P., Gaüzere J.-M., Gady C., Skiba F., Vilariño M., 2009. Valeur nutritionnelle d'une drêche de blé chez le coq et le poulet et effet du niveau d'incorporation et de l'ajout d'un complexe multi-enzymatique sur les performances de croissance des poulets standards. Huitièmes Journées de la Recherche Avicole, St-Malo, 25 et 26 mars 2009, pp. 167-171.

Nugues M., Métayer J.P., Duyme F., Skiba F., Vilariño M., 2013. Research of explanatory parameters of starch digestibility and energetic value of wheat by broiler by meta-analyses. 19th European Symp. Poul. Nut., Potsdam-Germany, August 26-29.

Péron A., Bastianelli D., Oury F.X., Gomez J., Carré B., 2005. Effects of food deprivation and particle size of ground wheat on digestibility of food components in broilers fed on a pelleted diet. British Poultry Science 46 (2), 223-230.

Quentin M., Bouvarel I., Bastianelli D., Picard M., 2004. Quels "besoins" du poulet de chair en acides aminés essentiels ? Une analyse critique de leur détermination et de quelques outils pratiques de modélisation. INRA Productions Animales 17, 19-34.

Scott T.A., Hall J.W., 1998. Using acid insoluble ash marker ratios (diet:digesta) to predict digestibility of wheat and barley metabolizable energy and nitrogen retention in broiler chicks. Poultry Science 77, 674-679.

Tancharoerat P., Ravindran V., Zaefarian F., Ravindran G., 2013. Digestion of fat and fatty acids along the gastrointestinal tract of broiler chickens. Poul. Sci., 93, 371-379.

Valdes E.V., Leeson S., 1992. Near Infrared Reflectance Analysis as a Method to Measure Metabolizable Energy in Complete Poultry Feeds. Poul. Sci. 71, 1179-1187

Vilariño M., Gaüzere J.M., Métayer J. P., Skiba F., 2007. Valeur énergétique de deux drêches de bioéthanol de blé chez le coq et effet du niveau d'incorporation sur les performances de croissance des poulets de chair. Septièmes Journées de la Recherche Avicole, Tours, 28 et 29 mars 2007, pp. 248-252.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL)