

DÉVELOPPEMENT DE NOUVELLES CALIBRATIONS DE SPECTROSCOPIE DANS LE PROCHE INFRAROUGE POUR LA PREDICTION DE LA DIGESTIBILITE DES NUTRIMENTS CHEZ LE POULET DE CHAIR

Traineau Maxime¹, Pareux Maryanne¹, Danel Justine¹, Ammari Faten², Faure
Marlène², Vilariño Maria¹

¹ARVALIS - Institut du végétal, 2 Pouline, 41100 Villerable, France

²ARVALIS - Institut du végétal, Route de Malesherbes, 91720 Boigneville, France

m.traineau@arvalis.fr

RÉSUMÉ

Depuis plusieurs années, ARVALIS - Institut du végétal développe des calibrations par Spectroscopie dans le Proche Infrarouge (SPIR) pour l'évaluation de la digestibilité des nutriments chez les volailles dont certaines sont déjà utilisées en routine. Ces calibrations permettent de prédire la composition chimique des fientes (amidon, azote et énergie), ce qui est un gain de temps important en évitant de passer systématiquement par des analyses chimiques. L'objectif de l'étude était d'évaluer les performances des nouvelles calibrations SPIR développées en 2020. Onze essais de digestibilités chez le poulet de chair (800 échantillons) et huit essais de digestibilités chez le coq (322 échantillons) ont été ajoutés à la base de calibration précédente, composée de 777 échantillons. La performance des nouvelles calibrations est estimée avec les coefficients de Pearson (R^2), la pente, le biais de la régression linéaire entre les valeurs mesurées et prédites et avec l'erreur standard de prédiction (SEP). Afin d'évaluer les résultats de ces calibrations de composition, des fientes provenant d'essais ne faisant pas partie de la base de données utilisée pour le développement sont étudiées. Les valeurs de digestibilité des nutriments sont calculées, soit à partir de la composition de fientes analysées par référence, soit issue des prédictions SPIR. Des essais de digestibilité menés sur des poulets de souches différentes et sur des animaux très jeunes ou des animaux adultes (coqs) permettent également d'évaluer ces calibrations avec des fientes très différentes. La digestibilité de tous les nutriments, calculée à partir de valeurs obtenues par SPIR sur les fientes, est fortement corrélée avec les valeurs issues des méthodes de référence ($p < 0,001$) pour tous les essais. Les performances sont également très bonnes pour les résultats sur fientes de poulets à croissance lente mais aussi de très jeunes poulets de cinq jours d'âge. De plus, ce nouveau modèle permet de prédire la composition chimique des fientes de coqs avec une corrélation très forte avec les résultats mesurés ($R^2 > 0,90$) pour la digestibilité de l'énergie et des écarts très faibles pour l'énergie digestible (moins de 20 kcal/kg MS). En conclusion, la prédiction de la composition des fientes (énergie, amidon et azote) est très proche des valeurs de référence et permet également de calculer la digestibilité de ces nutriments chez des volailles d'origines très diversifiées (souche standard, souche à croissance lente, jeunes animaux, coqs).

ABSTRACT

Development of new Near-Infrared Reflectance Spectroscopy calibrations for prediction of nutrient digestibility in broiler chicken

For several years, ARVALIS developed Near-Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) calibration to evaluate the nutrients digestibility in chicken and some of these calibrations are daily used. These calibrations allow to predict the chemical composition of diet and faeces (starch, nitrogen, energy) but also to directly predict nutrients digestibility without chemical analysis and the calculations usually used. The main goal of this study was to evaluate the new NIRS calibrations developed in 2020. Eleven digestibility trials in chickens (800 samples) and eight in roosters (323 samples) were added to the previous database already composed of 777 samples. The power of the new calibrations was estimated with the coefficient of determination (R^2), the slope of the linear regression between measured and predicted values, the standard error of prediction (SEP) and the bias. To evaluate the model of prediction of compositions, droppings from trials unused in the database were used to compare the calculated digestibility from analysed dropping with reference analysis or NIRS analyse. Digestibility trials on a different chicken strain but also on very young or adults' animals (roosters) allow to challenge the new model with various droppings. The digestibility of all nutrients, calculated from faecal composition with SPIR analysis, are highly correlated with data from reference method ($p < 0.001$) for all trials. The performances of the 2020 calibration are also very good for droppings from organic chicken strain but also for five days old chickens. In addition, the new calibrations allow to estimate the rooster's faeces composition with high correlation between predicted and measured results ($R^2 > 0.90$) for energy digestibility but also very small differences for digestible energy (less than 20 kcal / kg DM). As a conclusion, the predictions of droppings composition (energy, starch and nitrogen) are very close to the reference values and also make it possible to calculate the digestibility of these nutrients in very diverse fowl (standard chicken strain, slow growing strain, young animals, roosters).

INTRODUCTION

Aujourd'hui, l'estimation de la capacité des animaux à digérer les aliments et les matières premières qui les composent le plus précisément possible est un enjeu majeur en nutrition animale. Ces connaissances ont déjà permis d'optimiser de plus en plus la composition en matières premières des aliments distribués aux animaux. La méthode de référence pour acquérir ces données reste encore aujourd'hui un bilan digestif sur plusieurs jours consécutifs avec un suivi de la consommation (avec mise à jeun) et de l'excrétion des poulets ou des coqs (Bourdillon *et al.*, a et b 1990). L'ajout d'un marqueur non digestible permet néanmoins de réaliser des bilans digestifs sans mise à jeun, ce qui ne pénalise plus la croissance des animaux. Or, ces différents bilans ne permettent pas de faire l'évaluation rapide de la digestibilité des aliments par les animaux car nécessitent des analyses chimiques des fientes et des aliments.

L'utilisation des méthodes par spectrométrie dans le proche infra-rouge (SPIR) permet une évaluation plus rapide et moins coûteuse des valeurs chimiques ou nutritionnelles, mais cela nécessite une phase d'étalonnage qui lie le spectre IR aux résultats des analyses de laboratoire par méthodes de référence (composition chimique, valeur nutritionnelle...).

Une synthèse publiée récemment (Bastianelli *et al.* 2018) décrit les utilisations de la SPIR pour la caractérisation des ressources alimentaires sur plusieurs espèces.

Un projet de recherche multipartenarial (DIGSPIR 2010-2014) avait montré l'intérêt des méthodes SPIR pour estimer la composition chimique des fientes et alléger ainsi le coût analytique des essais de digestibilité chez le poulet. Il avait aussi démontré la faisabilité de prédire directement la digestibilité des aliments par les poulets à partir de la concaténation des spectres d'aliments et de fientes (Coulibaly *et al.*, 2013 ; Vilariño *et al.*, 2016).

Depuis, ARVALIS a continué à enrichir sa base de données (BDD) et à améliorer les calibrations, aujourd'hui utilisées en routine pour déterminer la composition chimique des fientes dans les essais de digestibilité chez le poulet de chair. La prédiction directe de digestibilité des nutriments est également suivie afin de continuer à développer les modèles de calibration prometteurs (Traineau *et al.*, 2017). Ainsi, en 2020, de nouveaux modèles de prédiction de la composition chimique des fientes ont été développés, avec une plus large variabilité de la BDD sur poulets standard et en intégrant également des données issues de bilans digestifs chez les coqs.

Cet article présente d'abord une description (matériel et méthodes) des performances obtenues avec les modèles de prédiction par SPIR de la composition chimique de fientes (F/SPIR), ainsi que celles des prédictions directes de la digestibilité des nutriments. Ensuite, plusieurs essais, non intégrés dans le développement des modèles, sont utilisés pour valider

les calibrations avec des données indépendantes, pour répondre aux questions suivantes :

- Est-ce que les valeurs de composition chimique des fientes prédites par SPIR (F/SPIR) et par méthodes de référence (F/REF), donnent des résultats équivalents dans le calcul des digestibilités ?

- Est-ce que les modèles F/SPIR, développés sur fientes de poulets standard de 21 à 25 jours d'âge, sont valides pour des fientes d'une souche à croissance lente ? de jeunes poulets ? des coqs ?

1. MATERIELS ET METHODES

La méthodologie utilisée dans le développement des nouveaux modèles, ainsi que celle permettant ensuite, d'évaluer leurs performances avec des données externes est décrite ci-dessous.

1.1. Paramètres SPIR et des modèles de calibration

Les spectres ont été réalisés avec l'appareil NIRSystem XDS (FOSS, USA). Les échantillons ont été scannés à des intervalles de 2 nm sur une plage de variation de longueurs d'onde allant de 400 à 2498 nm. Chaque spectre, correspondant à la moyenne de 32 scans, est représenté par l'absorbance (équivalent au logarithme inversé de la réflectance) en fonction de la longueur d'onde (en nm). Les données spectrales ont été traitées à l'aide du logiciel WinISI (Infrasoft International, USA).

Les étapes de développement sont les mêmes pour les modèles de prédiction de la composition chimique des fientes et de la digestibilité de nutriments des aliments. La première étape correspond aux prétraitements des spectres proche infra-rouge afin d'enlever le bruit et les variations des lignes de base mais également de limiter l'impact des facteurs environnementaux. Dans cette étude, différents prétraitements mathématiques ont été utilisés tels que la normalisation SNV, Detrend et MSC (Multiplicative Scatter Correction). Des dérivées premières et secondes avec différents niveaux de lissage ont également été testées. La BDD a été scindée en deux lots en utilisant l'algorithme Duplex : un lot de calibration pour développer le modèle et un lot de validation pour le tester.

Pour les modèles développés afin de prédire directement la digestibilité des nutriments ou la valeur énergétique des aliments, les spectres aliments et fientes ont été concaténés, comme dans les travaux précédents (Coulibaly *et al.*, 2013) avec un prétraitement mathématique (dérivée seconde, normalisation, lissage et correction de la ligne de base) pour tous les spectres.

Les modèles ont été développés en utilisant la méthode de régression des moindres carrés partiels modifiés (MPLS). Le modèle optimal a été choisi en se basant sur les paramètres suivants : l'erreur de calibration (SEC), l'erreur de validation croisée (SECV), l'erreur de prédiction (SEP), le coefficient de détermination (R^2), la pente et le biais.

1.1.1. Modèles de prédiction de la composition chimique des fientes

Pour élargir la BDD initiale composée de 777 échantillons (BDD 2014), 11 essais de digestibilité chez le poulet de chair standard (800 échantillons) et huit essais de digestibilités coq (322 échantillons) ont été ajoutés pour le développement des nouvelles calibrations (2020). Les performances des modèles 2020 sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1. Performances des modèles de prédiction de la composition chimique des fientes de poulets standard et coqs (% MS ou kcal/kg MS)

	AmiEnz	NFT	NTotal	EB
Lot de calibration				
N	975	681	1126	1234
SEC	0,56	0,08	0,16	48
SECV	0,61	0,10	0,18	59
R²	0,99	0,95	0,99	0,97
Lot de validation				
N	487	342	563	617
SEP	0,76	0,10	0,19	60
R²	0,99	0,91	0,99	0,95

N : Nombre d'échantillons ; SEC : Erreur de Calibration ; SECV : Erreur de Cross-Validation ; SEP : Erreur de Prédiction ; AmiEnz : Amidon enzymatique ; NFT : Azote fécal total ; NTotal : Azote Total avec $NFT = 1,29 * N_{terpstra} - 0,02 * N_{total}$; EB : Energie Brute

Les modèles 2020 permettent de prédire les différentes composantes des fientes avec des erreurs de prédiction de 0,76 point pour l'amidon, de 0,10 point pour l'azote fécal, de 0,19 point pour l'azote total et de 60 kcal/kg MS pour l'énergie brute (EB).

Les valeurs prédites avec ces nouveaux modèles sont fortement corrélées aux valeurs de référence ($R^2 = 0,99$ pour l'amidon enzymatique, $R^2 = 0,91$ pour l'azote fécal, $R^2 = 0,99$ pour l'azote total et $R^2 = 0,95$ pour l'EB). Par méthode de référence les erreurs sont 0,79 points pour amidon enzymatique, 0,8 points pour NFT, 0,15 points pour N Total et 55 kcal/kg MS pour EB.

1.1.2. Modèles de prédiction de la digestibilité

Comme pour les modèles de composition des fientes, de nouveaux modèles ont été mis à jour en 2020. Néanmoins, seuls les spectres des essais sur poulets standard ont été pris en compte (spectres coqs écartés). Les performances de ces modèles sont présentées dans le tableau 2. Les modèles 2020 permettent de prédire les digestibilités avec des erreurs de prédiction de 0,96 point pour l'amidon, de 1,73 point pour l'azote et de 2,63 points pour l'EB. L'énergie métabolisable apparente à bilan azoté nul (EMAn) des aliments est prédite avec une erreur de 95 kcal/kg MS.

Ces valeurs prédites avec la SPIR sont fortement corrélées aux valeurs de référence ($R^2 = 0,95$ pour la digestibilité de l'amidon, $R^2 = 0,88$ pour la digestibilité de l'azote, $R^2 = 0,76$ pour la digestibilité de l'énergie et $R^2 = 0,83$ pour l'EMAn).

Tableau 2. Performances des modèles de prédiction de la digestibilité et de la valeur énergétique des aliments chez le poulet standard. (% MS ou kcal/kg MS)

	CUDa Amidon	CUDa N	CUDa EB	EMAn
Lot de calibration				
N	1035	1049	1035	1033
SEC	0,69	1,28	2,1	77
SECV	0,85	0,146	2,43	91
R²	0,97	0,94	0,82	0,87
Lot de validation				
N	516	523	516	516
SEP	0,96	1,73	2,63	95
R²	0,95	0,88	0,76	0,83

N : Nombre d'échantillons ; SEC : Erreur de Calibration ; SECV : Erreur de Cross-Validation ; SEP : Erreur de Prédiction ; CUDa : Coefficient d'Utilisation Digestive apparente ; Amidon : Amidon enzymatique ; N : Azote ; EB : Energie Brute ; EMAn : Energie Métabolisable Apparente à bilan azoté nul.

1.2. Données externes pour la validation des modèles de prédictions.

Au total sept essais de digestibilité sur poulets et 14 essais sur coqs sont utilisés pour évaluer les performances des modèles de prédiction de la composition des fientes 2020. Aucun de ces essais ne faisait partie de la BDD des modèles. Ces essais se sont déroulés dans la même unité et dans les mêmes conditions d'expérimentation que les essais intégrés aux modèles. Ce même travail de validation, pour les modèles de prédiction directe de la digestibilité est en cours et sera publié ultérieurement. Ces nouvelles données viendront enrichir la BDD précédente qui a donné lieu aux modèles développés auparavant (Traineau *et al.*, 2017), suivant le même principe de la concaténation des spectres d'aliments et de fientes.

1.2.1. Essais pour validation sur poulet standard 21-25 jours d'âge.

Cinq de ces essais (E1 à E5) concernent des animaux semblables à ceux de la population de calibration, soit, pour chaque essai, 72 poulets mâles de type standard (croissance rapide), mis en bilan individuel autour de J21 à J25. Dans ces essais, des régimes très différents sont évalués, composés de matières premières variées (tourteaux de soja, colza et tournesol ayant subi différents traitements) avec des niveaux différents de céréales (blé, orge et maïs), des régimes complets avec des additifs alimentaires et des régimes avec du blé de force. Ces essais, portant sur des thématiques très différentes, permettent donc de bien estimer les performances des nouvelles calibrations.

1.2.2. Essais de validation des effets souche et stade physiologique.

Il était intéressant de travailler sur des fientes différentes de celles utilisées pour le développement des calibrations. En effet, il est pertinent de savoir si les modèles développés fonctionnent également sur

des volailles d'une autre souche ou sur des volailles à des âges de maturité très différents (poussins de 5 à 20 jours et coqs adultes).

Un premier essai (E6) évaluait la digestibilité chez 72 poulets à croissance lente (JA 657) entre J22 et J25 nourris avec des aliments riches en tourteaux de colza, de tournesol ou en pois. Un second essai (E7) réalisé chez des ROSS PM3, avec des bilans digestifs à J5-J6, J11-J12 et J19-J20 a également évalué des aliments complets de type commercial.

Enfin, 14 essais coqs ont été mis en place depuis le développement des modèles 2020. Pour chacun de ces essais, les fientes de 18 coqs logés en cage individuelle étaient collectées pendant 3 jours, selon la méthode de référence (Bourdillon *et al.*, a et b 1990). La composition chimique des fientes ainsi collectées a été déterminée par méthode de référence et par SPIR.

1.3. Analyses statistiques sur la validation avec des données externes

Pour évaluer la performance des modèles de prédiction de la composition des fientes avec des données externes (essais qui ne font pas partie de la base de calibration des modèles 2020), les valeurs de digestibilité des nutriments sont comparées, selon que les données de composition chimique des fientes servant aux calculs soient issues des méthodes de référence (F/REF), ou des prédictions du modèle 2020 (F/SPIR). Cette comparaison est faite avec deux types d'analyse statistique, des corrélations de Pearson et des ANOVA. Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel de traitements statistiques XLSTAT 2021 2.2.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau 3. Comparaison entre les coefficients d'utilisation digestive apparente (CUDa) de l'énergie, de l'amidon et de l'azote pour chaque essai en fonction de la méthode d'obtention des données (F/REF ou F/SPIR)

Essai	CUDa EB			CUDa amidon			CUD N		
	CP ^a (R ²)	ANOVA ^b	Biais	CP (R ²)	ANOVA	Biais	CP (R ²)	ANOVA	Biais
E1	0,96	ns	0,47	0,98	ns	-1,10	0,97	ns	-0,41
E2	0,99	ns	-0,86	0,99	ns	-0,98	0,95	*	-2,43
E3	0,99	**	-2,11	0,99	*	-2,00	0,67	**	-3,84
E4	0,94	ns	0,36	0,98	ns	-0,77	0,99	*	2,31
E5	0,84	ns	1,30	0,86	ns	0,70	0,98	*	2,41
E6 (CL)	0,98	ns	-0,26	0,91	ns	0,28	0,97	ns	0,75
E7 (J5-J6)	0,94	ns	0,21	0,92	ns	-0,03	0,60	ns	0,12
E7 (J11-J12)	0,99	ns	0,00	0,91	ns	-0,04	0,93	*	-1,60
E7 (J19-J20)	0,97	ns	0,16	0,99	ns	-0,80	0,80	ns	-0,17

^a Corrélations de Pearson ; ^b ANOVA avec test a posteriori de Tukey ; ns : $P > 0,05$; * : $P < 0,05$; ** : $P < 0,01$; *** : $P < 0,001$; ^c Ecart entre les moyennes selon la méthode d'obtention de données : F/REF : Composition de fientes par analyses de référence ; F/SPIR : Composition de fientes par Spectrométrie dans le Proche Infrarouge ; Ecart : F/REF - F/SPIR.

Le tableau 3 présente les différentes comparaisons entre les coefficients d'utilisation digestive apparente (CUDa) calculés à partir de la composition chimique des fientes obtenue par méthodes de référence (F/REF), et ceux calculés à partir de la composition chimique prédite par SPIR (F/SPIR).

2.1 Prédications sur fientes de poulet standard (essais E1 à E5).

Les valeurs de digestibilité de l'énergie (CUDa EB) obtenues à partir des valeurs de composition des fientes par référence (F/REF) ou par SPIR (F/SPIR) sont très bien corrélées ($R^2 > 0,84$). Un seul essai (E3) montre une différence statistique de -2 points en moyenne pour tous les régimes, entre les deux méthodes. Cette différence est probablement expliquée par la mauvaise prédiction de deux aliments composés d'un blé de force générant des spectres particuliers qui s'écartent du nuage de la base utilisée pour le développement du modèle 2020.

Les valeurs d'EMAn des aliments (non présentées dans le tableau) donnent les mêmes performances que celles des CUDa EB, avec des R^2 supérieurs à 0,86 pour tous les essais et un biais moyen entre F/REF et F/SPIR allant de 13 à 87 kcal/kg MS (la valeur la plus forte provenant de l'E3). Comme pour l'énergie, les corrélations pour les CUDa amidon sont très élevées ($R^2 > 0,86$). Les écarts entre les deux méthodes vont de -2 à +0,7 points, la valeur la plus forte correspondant à l'E3, mal prédit pour les mêmes raisons que pour l'énergie.

Pour les valeurs de CUDa N, les corrélations sont également élevées pour la plupart des essais ($R^2 > 0,95$), sauf pour E3 avec un R^2 de seulement 0,67.

Cependant, à la différence des autres critères, les écarts à la référence sont statistiquement significatifs pour 4 essais sur 5, avec une plage de variation allant de -3,8 à +2,4 points. Pour ce paramètre, le modèle nécessitera un travail complémentaire afin d'optimiser les performances.

2.2. Prédiction sur fientes de poulets de souche à croissance lente (essai E6).

Concernant l'essai E6 pour lequel les fientes provenaient de poulets de souche à croissance lente, les résultats sont très satisfaisants pour tous les paramètres mesurés. En effet, pour les digestibilités de l'énergie, de l'amidon et de l'azote, les coefficients Pearson entre la méthode F/REF et F/SPIR sont respectivement 0,98, 0,91 et 0,97. De plus, les écarts sont faibles (-0,26, +0,24 et +0,75 respectivement) et non significatifs. Pour l'EMAN, l'écart moyen entre les deux méthodes n'est que de 3 kcal/kg MS avec un R^2 de 0,98. Ces résultats permettent de conclure, à ce stade et avec un seul essai, sur la validité des modèles F/SPIR sur de poulets à croissance lente, alors qu'ils ont été développés sur de souches à croissance rapide.

2.3. Prédiction sur fientes de poulets standards à différents âges (E7).

Pour les bilans digestifs à des âges plus précoces (J5-J6 et J11-J12) que les bilans habituellement réalisés autour de J21-J24, les résultats semblent très probants. En effet, pour le CUDa EB, pour les trois périodes de bilan, les corrélations varient entre 0,94 et 0,99 entre les méthodes F/REF et F/SPIR, ce qui est du même niveau que pour les essais E1 à E4. La différence maximale est de seulement 0,2 point pour le bilan J5-J6 et aucune différence significative n'est mise en évidence, quelle que soit la période. Pour l'EMAN, les corrélations varient de 0,91 à 0,98 et les écarts pour les trois bilans sont inférieurs à 10 kcal/kg MS. Les corrélations du CUDa amidon, pour les trois périodes ont un $R^2 > 0,91$ et l'écart maximal observé entre les données issues de la référence et les valeurs prédites est de -0,8 point. Enfin pour le CUDa N, comme pour les essais précédents, les résultats sont un peu moins précis avec des R^2 assez variables selon les âges (0,60 à 0,93), le plus faible étant à J5-J6, cet écart

est non significatif. Par ailleurs, le seul écart significatif est celui du bilan à J11-J12 (-1,6 point).

2.4. Prédiction sur fientes de coqs.

Pour les essais sur coq, seules les valeurs du CUDa énergie et d'EMAN ont été analysées afin de comparer, comme chez les poulets, les valeurs obtenues à partir de F/REF en comparaison des F/SPIR. Pour 13 essais sur 14, les corrélations pour l'EMAN et le CUDa EB ont un R^2 moyen de 0,96 avec des valeurs allant de 0,82 à 0,99. Les écarts de résultats entre la méthode d'analyse de fientes par référence et par SPIR varient de 5 à 21 kcal/kg MS. Ces très bons résultats montrent bien que pour les essais digestibilité chez le coq, la prédiction par SPIR de la composition des fientes, plus rapide et moins onéreuse, apporte les mêmes résultats que l'analyse par méthode de référence. Un seul essai donne de résultats peu précis, avec un R^2 de 0,38 et un écart de -156 kcal/kg MS (F/REF - F/SPIR) en moyenne pour deux régimes à haut niveau de gluten de blé (8 et 10 %). En effet, la base de calibration ne contient pas de données avec des niveaux si importants en gluten de blé. Ce type de matière première pourrait être intégré lors d'une actualisation des calibrations, mais le résultat est intéressant en soi du fait de la mise en évidence d'une caractéristique dans l'aliment qui modifie le spectre des fientes.

CONCLUSION

Les modèles 2020 de prédiction de la composition chimique de fientes par SPIR sur les critères énergie, amidon et azote, sont robustes et les valeurs en découlant peuvent être utilisées dans le calcul de la digestibilité de ces nutriments. Les modèles développés sont utilisables sur les fientes des souches à croissance lente mais également celles de coqs. De plus ces modèles donnent de très bons résultats sur les fientes de poulets à tous âges, même les très jeunes, pour lesquels les quantités excrétées sont faibles et les méthodes de référence parfois difficiles à mettre en œuvre. Il reste à valider les modèles de prédiction directe de la digestibilité avec des données indépendantes, ce qui sera une avancée importante dans l'utilisation de la SPIR dans l'évaluation de la qualité nutritionnelle des aliments.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bastianelli D., Bonnal L., Barre P., Nabeneza S., Salgado P., Andueza D., 2018. INRA Prod. Anim., 31 (3), 237-254.
Bourdillon A. (a), Carré B., Conan L., Francesch M., Fuentes M., Huyghebaert G., Janssen W.M.M.A., Leclercq B., Lessire M., McNab J., Rigoni M., Wiseman J., 1990. Brit. Poult. Sci., 31, 567-576.
Bourdillon A. (b), Carré B., Conan L., Duperray J., Huyghebaert G., Leclercq B., Lessire M., McNab J., Wiseman J., 1990. Brit. Poult. Sci., 31, 557-565.
Coulibaly I., Métayer J.P., Chartrin P., Mahaut B., Bouvarel I., Hogrel P., Bastianelli D., 2013. 10èmes Jour Rech. Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, 640-644.
Traineau, M., Métayer J.P., Mahaut B., Ammari F., Vilariño M., 2017. 21st Eur. Symp. Poultry Nutr.
Vilariño, M., Métayer J.P., Mahaut B., Bouvarel I., Lescoat P., Chartrin P., Fournis Y., Hogrel P., Bonnal L., Bastianelli D., 2016. Innovations Agronomiques 49, 163-177.