



La composition des litières de poulet de chair évaluée par la spectroscopie proche infra-rouge

Principaux résultats issus d'un projet national

RÉSUMÉ

Au cours d'un projet national multi partenarial visant à mieux caractériser les effluents d'élevage en France, il a été testé la possibilité d'utiliser l'outil 'spectroscopie dans le proche infrarouge' (SPIR) pour accéder à leur composition. Dans cet article, nous avons reporté les résultats dédiés aux litières de poulet de chair, collectées en métropole et à la Réunion. Les échantillons ont été analysés pour déterminer leurs teneurs en matière sèche (MS), azote total (N) et ammonium (NNH₄). Le respect de procédures de collecte, préparation, conservation et analyses, communes aux différents partenaires, a permis d'homogénéiser les réponses analytiques. Après homogénéisation des réponses spectrales des spectromètres utilisés (standardisation, suppression des interférences dues aux accessoires utilisés lors des passages des échantillons en SPIR), les modèles SPIR élaborés ont montré leur intérêt pour caractériser le potentiel agronomique des litières à l'état frais. Parmi les principaux résultats, les modèles pour déterminer la teneur en matière sèche développés sur un spectromètre de laboratoire comme en bord de bâtiment avec un spectromètre portable sont aussi performants que les analyses de référence au laboratoire et peuvent donc être transférés. D'autre part, le modèle développé au laboratoire pour déterminer la teneur en azote des litières fraîches homogénéisées au broyeur alimentaire semble une bonne alternative aux analyses de référence ; son écart-type résiduel de prédiction n'est que de deux à trois fois plus élevé que celui observé par ailleurs pour des litières séchées et broyées finement. De plus, même réalisée sur un plus petit effectif, la caractérisation des litières à l'état frais après une homogénéisation manuelle en bord de bâtiment semble intéressante. L'ensemble des modèles élaborés au cours de cette étude représente une alternative aux analyses de laboratoire généralement longues, chères et utilisant des produits souvent dangereux pour le manipulateur et l'environnement.

Laurent THURIÈS¹, Sandra AUBERT²,
Denis BASTIANELLI³, Laurent BONNAL³,
Nathalie DAMAY⁴, Fabrice DAVRIEUX⁵,
Hélène DUCEPT⁴, Caroline LE ROUX⁴,
Thierry MORVAN⁶, Géraud MOUSSARD¹,
Séverine TRUPIN², Matthieu VALÉ⁷,
Pierre DARDENNE⁸

1 CIRAD, UPR Recyclage et risque – F-97408 SAINT-DENIS – LA REUNION – FR

2 Arvalis-Institut du Végétal – SQV – F-91720 – BOIGNEVILLE

3 CIRAD – UMR Selmec – F-34398 MONTPELLIER

4 LDAR – 180 Rue Pierre-Gilles de Gennes – F-02007 LAON

5 CIRAD, UMR Qualisud – F-34398 MONTPELLIER

6 INRA, UMR SAS – 4 rue de Stang Vihan – F-29000 QUIMPER

7 SAS Laboratoire – BP 10636 – F-45166 OLIVET

8 CRA-W, Valorisation of Agricultural Products Dept – B-5030 GEMBLOUX, BEL

Contact : laurent.thuries@cirad.fr

1. Objectifs

Les effluents d'élevage représentent 95 % des matières organiques utilisés à des fins de fertilisation (amendements et engrais organiques) en France. Leur nature et leur composition peut varier en fonction des systèmes d'élevage, des conditions de stockage ou des traitements post-collecte. Même s'il existe de nombreuses études sur le recyclage agricole des effluents d'élevage en France, le besoin de connaissance sur leurs caractéristiques ne se dément pas. Accéder à leur composition est d'un grand intérêt pour les outils d'aide à la décision pour la gestion des effluents d'élevage. La Spectroscopie dans le Proche Infrarouge (SPIR) est un outil analytique qui représente une méthode alternative aux analyses de référence souvent longues et coûteuses. La SPIR a été mise en œuvre depuis plus de dix ans pour évaluer la composition des effluents ; (Reeves and Van Kessel 2000, Cozzolino et al. 2002, Tasistro et al. 2003, Dagnew et al. 2004, Bastianelli et al. 2007a, Bastianelli D. et al. 2010), mais cependant pas sur une base nationale pour (toute) la France. Un projet national financé par le Compte d'Affectation Spéciale pour le Développement Agricole et Rural (CasDAR) a alors été conduit pendant trois ans sous l'égide de l'ACTA, avec la participation de seize partenaires issus d'instituts de recherche, d'instituts techniques, de chambres d'agriculture et de laboratoires d'analyse pour "Améliorer la caractérisation des effluents d'élevage par des méthodes et des modèles innovants pour une meilleure prise en compte agronomique ». Les trois principaux effluents d'élevage en France ont été l'objet de ce projet. Dans cet article, nous exposons les principaux résultats de caractérisation par SPIR de la composition d'un effluent majeur de la filière avicole en France : les litières de poulet de chair.

Les objectifs de cet article étaient : 1) d'élaborer des modèles SPIR pour la prédiction des principales caractéristiques agronomiques des litières de poulet de chair en France, 2) de réaliser une étude de faisabilité de l'utilisation de l'outil SPIR pour évaluer la composition des litières de poulet de chair directement dans les bâtiments d'élevage.

2. Matériels et méthodes

2.1. Nature, origine, collecte, préparation et analyses spectrales des litières

Afin de minimiser les risques de problèmes pouvant advenir lors d'inter-comparaisons de résultats analytiques, il a été porté une grande attention au respect de la méthode d'échantillonnage, de conservation, de la préparation et du conditionnement des échantillons décidée collégialement.

2.1.1. Nature et composition des litières

Les fumiers de volaille sont constitués des fèces déposées sur un support carboné (litière). Alors qu'en métropole ce dernier peut être représenté par des pailles de blé ou des copeaux de bois, à la Réunion, le support carboné est représenté en quasi-totalité par des copeaux de bois, très majoritairement de *Cryptomeria japonica*, ou bien d'autres 'bois rouges' (bois exotiques de menuiserie) et très exceptionnellement des cartons recyclés (un seul élevage). Ces supports carbonés sont positionnés en début de bande et se trouvent plus ou moins décomposés en sortie de bande.

Par rapport à ceux de la métropole, les fumiers avicoles en sortie de bande sont moins riches en éléments fertilisants à la Réunion (tableau 1). Après stockage, les différences s'estompent.

À la Réunion, les fumiers de poulet de chair sont plutôt secs avec un taux d'humidité variant de 20 à 50 % et les teneurs en matières organiques sont plutôt élevées (environ 50%). Avec un rapport C/N compris entre 10 et 20, les fumiers de volailles sont considérés comme des amendements organiques relativement matures (Chabalier et al., 2006).

2.1.2. Origine et collecte

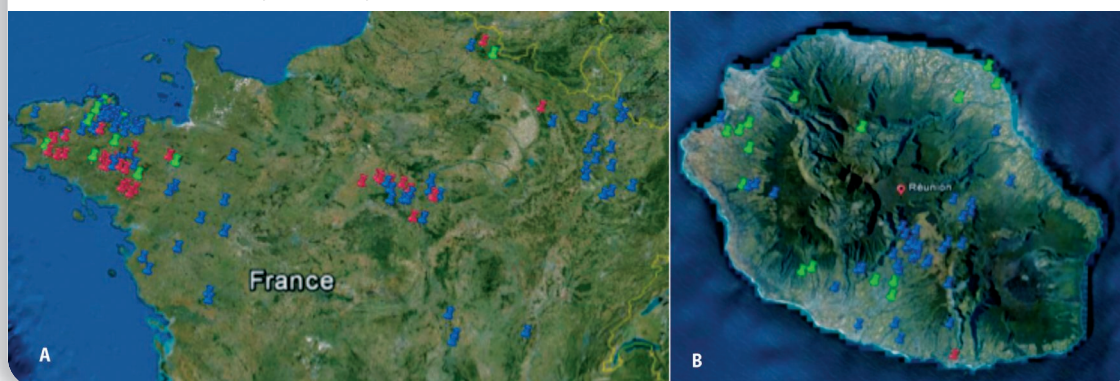
En métropole comme à la Réunion, les principales régions de production avicole ont été ciblées pour collecter un total de 165 litières de poulet (LIT), comme illustré sur la Figure 1.

■ Tableau 1 — Teneurs moyennes en azote (N) total, phosphore (P₂O₅) et potassium (K₂O) (kg/t de produit brut) des fumiers avicoles, en sortie de bande et après stockage, en Métropole et à la Réunion (d'après Chabalier et al., 2006).

Type de fumier	Métropole			Réunion		
	N total	P ₂ O ₅	K ₂ O	N total	P ₂ O ₅	K ₂ O
Poulet et dinde : en sortie de bande	30	27	20	20	15	16
Poulet et dinde : après stockage	22	23	18	25	17	19

Les collectes ont été planifiées pour être réalisées immédiatement après sortie des bandes de poulets et le plus rapidement possible pour ne pas allonger la période de vide sanitaire avant le positionnement d'une nouvelle bande de poussins.

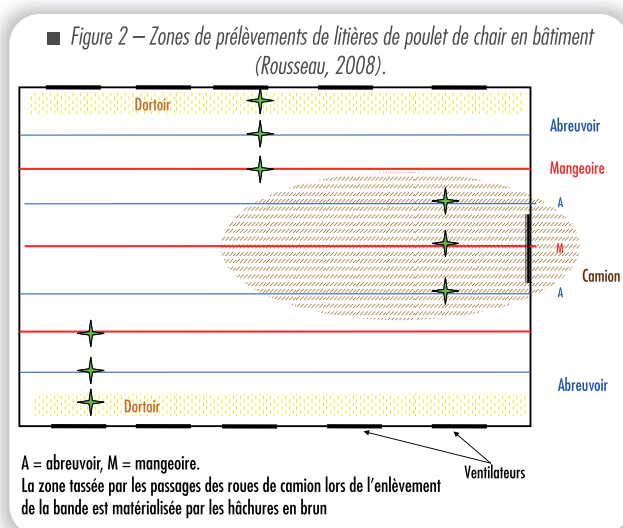
■ Figure 1 — Elevages avicoles (points verts) échantillonnés en métropole (a) et à la Réunion (b).



2.1.3. Prélèvements

En tenant compte des particularités des bâtiments d'élevage (Bastianelli et al., 2007a), le protocole de prélèvement des échantillons de litières de volaille en bâtiment élaboré lors de projets antérieurs (Rottatinti, 2010 ; Rousseau, 2008) a été adopté pour ce projet. Brièvement, selon la taille des bâtiments, il a été constitué de 3 à 6 échantillons par zone caractéristique (abreuvoir, mangeoire, dortoir, zone tassée par les passages de roues des camions à l'enlèvement) en veillant à prélever l'ensemble de la couche de litière. Ainsi, un bâtiment pouvait générer de 12 à 24 échantillons élémentaires. A partir de l'ensemble des échantillons élémentaires, un échantillon moyen (composite) a été constitué par bâtiment.

A titre d'illustration, à la figure 2 sont reportées les différentes zones dans un bâtiment où un cheminement s'opère pour réaliser les prélèvements individuels.



2.1.4 Préparation et analyses spectrales

Chaque échantillon individuel a été soumis à une homogénéisation grossière manuelle dans un bac de 15 litres. Les échantillons composites ont été constitués à partir des échantillons individuels par prélèvement d'une aliquote après mélange/retournement à la pelle d'un volume de 150 à 300 litres. L'acquisition des spectres sur le terrain n'a été réalisée qu'à la Réunion sur

les échantillons individuels et les composites. Un spectromètre proche infrarouge portable (LabSpec, ASD Inc., Boulder, CO, USA) équipé d'une fibre optique (figure 3) a permis d'acquérir 10 spectres à la surface des échantillons homogénéisés manuellement. Les spectres ont été collectés tous les 1nm, moyennés (32 scans par répétition) et enregistrés en absorbance ($\log(1/\text{réflectance})$).

Que ce soit en métropole comme à la Réunion, les échantillons ont été transportés rapidement dans un contenant réfrigéré pour éviter les pertes d'eau et d'ammoniac. A réception au laboratoire, ils ont été homogénéisés à l'aide d'un broyeur alimentaire (Dito K45 Electrolux) puis séparés en 2 aliquotes de 500 g. La première a été archivée en congélateur pour les analyses d'azote ammoniacal a posteriori. La seconde a été utilisée pour les autres analyses de référence et les mesures spectrales de laboratoire.

Chaque échantillon a été scanné au spectromètre de laboratoire (« SPIR sur frais-homogénéisé ») avant d'être pré-séché à 40°C et broyé à 1 mm. La matrice « broyé-séché » a été scannée au spectromètre de laboratoire (« SPIR sur sec-broyé ») et utilisée pour réaliser les principales analyses chimiques de référence.

Les données spectrales ont été collectées en réflectance tous les 2 nm (gamme du visible et du proche infrarouge : 400-2498 nm) à l'aide de spectromètres proche infrarouge à monochromateur modèle XDS (Foss, Silver Spring, MD, USA) pour deux partenaires (Arvalis et Cirad) et un NIRFlex (Büchi, Flawil, Suisse) pour le LDAR. Les échantillons frais homogénéisés ont été scannés à l'aide d'une coupelle rectangulaire à fenêtre en quartz (10/5/5 cm) alors que les secs l'ont été dans des cellules circulaires ('ring cups' de 5 cm de diamètre) au Cirad. Pour Arvalis et le LDAR, les échantillons frais ont été scannés à l'aide de boîte de Petri et de cristallisoir en verre borosilicaté. Chaque échantillon a été scanné automatiquement 32 fois ; après contrôle de la RMS (erreur spectrale), un spectre moyen est ensuite enregistré sous forme du logarithme de son absorbance ($\log 1/R$).

2.1.5 Standardisation des spectres entre laboratoires

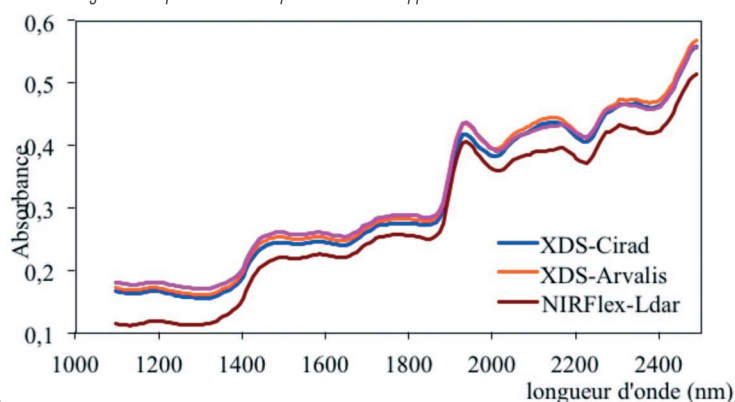
Les spectres ayant été obtenus avec plusieurs appareils à l'aide d'accessoires différents dont certains absorbent dans le PIR (boîte de Petri et cristallisoir en verre borosilicaté), il a été nécessaire de standardiser les réponses spectrales des différents appareils pour pouvoir traiter les données sur la même base, les réponses étant différentes selon les appareils (figure 4).

La standardisation a été réalisée en soustrayant l'absorption par les contenants en verre utilisés par Arvalis et LDAR, et par la mesure des spectres de cellules de référence scellées préparées par le Cirad, sur tous les appareils (Ait Aissa, 2012; Thuriès et al., 2012; Thuriès et al., 2013). Le traitement des

■ Figure 3 — Acquisition de spectres PIR dans les bâtiments (surface des litières ; résultats non présentés dans cette étude) ou après homogénéisation manuelle (exemple de droite illustré pour des fumiers de bovin, plus hétérogènes que les litières).



■ Figure 4 – Spectres mesurés par les différents appareils sur un échantillon de référence.

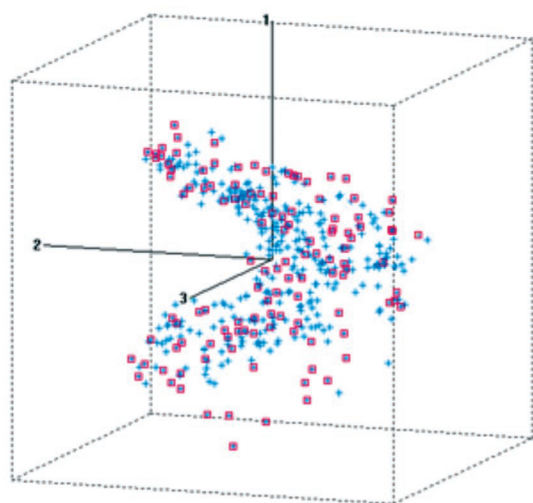


données (correction en X et Y, i.e. longueur d'onde et absorbance) a été réalisé avec le logiciel Win-ISI (Infrasoft International, Port Matilda, PA, USA).

2.1.6 Sélection de l'effectif

Cette première étape de standardisation a permis de regrouper l'ensemble des mesures spectrales de tous les partenaires et de réaliser la sélection de l'effectif permettant d'établir la liste des échantillons pour tous les partenaires

■ Figure 5 – Analyse en Composantes Principales. Projection des spectres des échantillons de fumier de volailles sélectionnés sur l'effectif total.



sur lesquels les analyses de référence ont été faites.

Sur la figure 5, on observe une bonne représentativité de l'effectif de litières de volailles retenu pour le calibrage (points rouges), par rapport à l'ensemble des spectres de l'effectif total (points bleus).

2.2 Analyses de référence

Les mesures des humidités à 40°C ('échantillon partiellement sec' MS 40) et à 105°C (MS105) ont été effectuées systématiquement sur tous les échantillons. Les échantillons composites ont été systématiquement soumis aux autres analyses de référence. Seuls les échantillons élémentaires sélectionnés sur la base de la représentativité de la diversité spectrale (via une analyse en composantes principales) ont été soumis aux autres analyses de référence. Les teneurs en azote total ont été mesurées selon la méthode de Kjeldahl, l'azote ammoniacal par distillation conformément au protocole adopté par les partenaires.

A la Réunion, les écart-types de laboratoire (ou standard error of laboratory, SEL) ont été estimés à l'aide de mesures répétées sur des témoins internes (fumier, fourrage) utilisés pour élaborer des cartes de contrôle.

2.3 Elaboration des modèles proche infrarouge

2.3.1 Traitements mathématiques

Les spectres ont été pré-traités mathématiquement selon la procédure 'standard normal variate and detrend' ou SNVD (Barnes et al. 1989) qui permet d'éliminer (ou de fortement corriger) l'influence de la granulométrie des particules sur le signal, et d'effectuer une correction de la ligne de base (qui a tendance à dériver lors de l'acquisition des spectres). Les spectres ont été transformés par traitements mathématiques à l'aide du logiciel Win-Isi (Infrasoft International, Port Matilda, PA, USA) : dérivée seconde calculée sur 5 points.

2.3.2 Calibrages (« calibrations »)

L'étalonnage (calibrage) des paramètres étudiés a été réalisé en utilisant la méthode de régression des moindres carrés partiels modifiée (mPLS) (Shenk and Westerhaus 1991) à l'aide du logiciel Win-Isi (Infrasoft International, Port Matilda, PA, USA). La méthode mPLS est généralement employée pour des jeux de données dépassant les 100 échantillons, aussi, on a utilisé la régression linéaire multiple (en anglais MLR) pour des jeux de données de taille plus modeste ; ici sur les 74 valeurs de N (spectres acquis au laboratoire), 46 valeurs de MS, N et N-NH₄ (spectres acquis bord de bâtiment). Les statistiques d'étalonnage ('calibration') comprennent l'écart-type d'étalonnage (standard error of calibration, SEC), le coefficient de détermination (r^2), l'écart-type de validation croisée (standard error of cross-validation, SECV), et le coefficient de variation (SECV en % de la moyenne). La validation croisée consiste en l'application d'une méthode de Jackknife, avec la prédiction de sous-groupes par des équations développées sur le reste de la base de calibration. Cela permet de calculer un écart-type résiduel (SECV). Pour évaluer la qualité générale de l'équation d'étalonnage développée pour chaque paramètre, on peut utiliser le r^2 , mais aussi le rapport RPD (ratio performance to deviation = écart-type de la population / SECV). A la différence de SEC et SECV, le RPD a l'avantage d'être indépendant des unités des paramètres (Sinnave et al. 1994), et peut donc être comparé entre paramètres.

3. Résultats

Selon les paramètres analytiques ou le mode d'acquisition des spectres (bord de bâtiment ou laboratoire), les performances des modèles étaient différentes. Les statistiques générales des analyses de référence ainsi que les statistiques de calibrage sont reportées au tableau 2.

Les différences d'origine, nature des aliments, nature des supports carbonés, mode d'élevage (ex. bâtiments plus ou moins ventilés), localisation, appareils utilisés pour acquérir les spectres PIR avec différents accessoires, et

■ Tableau 2 — Statistiques des modèles d'étalonnage SPIR pour les litières de poulet de chair collectées en métropole et à la Réunion.

paramètre	jeu	n	m	SD	SECV	SEL/SECV	r ²	RPD	CV%	régression
MS	LIT	155	59,8	12,4	1,51	1,11	0,985	8,2	2,5	mPLS
	LIT-bât	46	64,7	12,44	1,49	1,10	0,985	8,3	2,3	MLR
N	LIT	74	4,93	1,22	0,38	3,40	0,901	3,2	7,7	MLR
	LIT-bât	39	4,10	0,69	0,39	3,49	0,667	1,8	9,5	MLR
NNH ₄	LIT	153	1,03	0,43	0,14	2,12	0,892	3,1	14	mPLS
	LIT-bât	45	0,96	0,41	0,09	1,46	0,942	4,2	10	MLR

LIT = litières à l'état "frais homogénéisé au broyeur alimentaire" au laboratoire ; LIT-bât = litières à l'état "frais homogénéisé manuellement" en bord de bâtiment. Teneurs en MS en g 100g⁻¹ PB. Teneurs en N et NNH₄ en g 100g⁻¹ MS. n = nombre d'échantillons ; m = moyenne ; SD = écart-type ; SECV = Standard Error of Cross Validation ; SEL/SECV = rapport Standard Error of Laboratory / Standard Error of Cross Validation ; r² = coefficient de détermination ; RPD = ratio performance to deviation (rapport de SD/SECV), CV% = coefficient de variation (SECV exprimé par rapport à la moyenne) ; régression = type de régression (Cf. matériel et méthodes pour une description détaillée des abréviations).

l'hétérogénéité naturelle des litières (les deux constituants que sont le support carboné et les fèces), peuvent constituer des sources de variabilité à l'origine d'éventuels problèmes de capacité prédictive des modèles SPIR. Cela a été avancé par plusieurs auteurs pour différents effluents d'élevage (ex. (Dagnew et al. 2004; Malley et al. 2002)). Dans notre étude, ces facteurs de variation étaient tous présents. Malgré cela, les modèles élaborés ici peuvent être considérés comme bons à excellents. En effet, pour les litières scannées au laboratoire, quels que soient les paramètres, les r² approchaient ou dépassaient 0,90, le critère qualitatif RPD était supérieur à 3, et les CV variaient de 2,5 à 14 % (tableau 2). Des performances comparables ont été reportées par d'autres auteurs (Chen et al. 2009) pour des jeux de données de taille plus modeste. Un résultat remarquable de notre étude est que les SECV obtenus pour des échantillons scannés à l'état frais homogénéisés au broyeur alimentaire (granulométrie estimée à 0,5-1 cm) ne sont que deux à trois fois plus élevés que ceux reportés pour des litières scannées à l'état sec et broyé à 1 mm (Bastianelli et al. 2007b). On perçoit déjà tous les avantages de ces modèles si on peut utiliser des litières sans passer par des étapes longues, fastidieuses et coûteuses de séchage et broyage fin. Les rapports entre les écarts-types de laboratoire et les écarts-types résiduels des modèles SPIR (rapport SEL/SECV, tableau 2) calculés pour MS (et éventuellement pour N-NH₄) indiquent que les modèles SPIR correspondants sont tout à fait adaptés à une utilisation au laboratoire en tant que méthode rapide et peu chère, alternative aux analyses de référence. A la figure 6 on peut observer la bonne correspondance entre teneurs en

MS mesurées au laboratoire et celles prédites par SPIR, pour des échantillons frais homogénéisés au broyeur alimentaire et scannés au laboratoire et même pour des échantillons frais homogénéisés manuellement scannés avec un spectromètre SPIR de terrain. Il n'y a pas de zone dans la gamme qui ne soit pas bien prédite. La teneur en MS est le paramètre généralement le plus aisé à calibrer en SPIR,

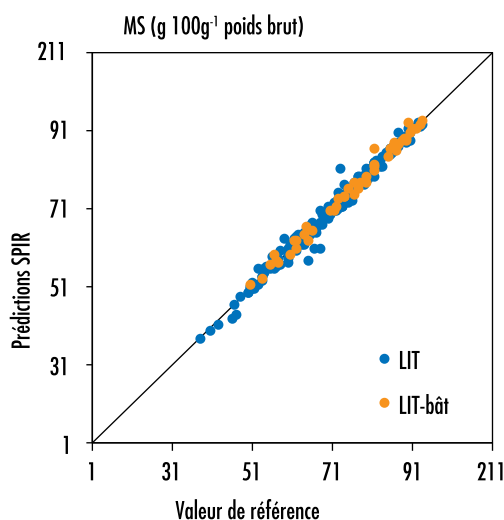
l'eau absorbant beaucoup dans le proche infrarouge. Les modèles MS élaborés dans cette étude ne dérogent pas à ce qui est observé par ailleurs.

Que ce soit à partir du tableau 2, de la figure 6 ou de la figure 7, on peut dire que même s'ils nécessitent peut-être encore un peu d'amélioration de performance, les modèles développés à partir de litières à l'état frais et homogénéisés manuellement en bord de bâtiment ne sont pas très fortement dégradés en termes de performance si on les compare aux modèles développés au laboratoire sur des échantillons frais homogénéisés plus finement au broyeur alimentaire.

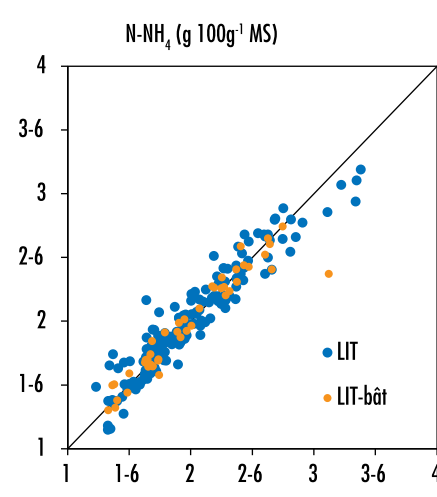
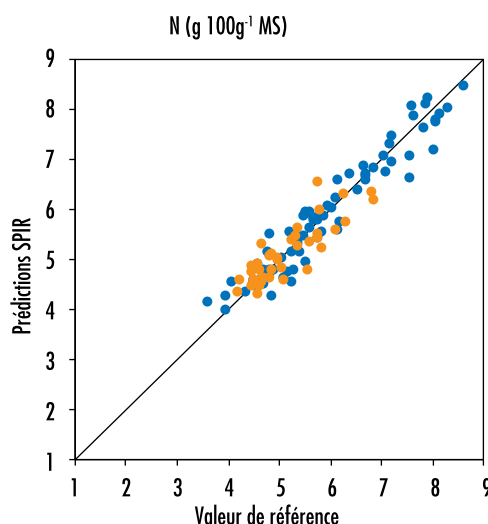
Même pour le modèle N 'bord de bâtiment' (r² < 0,7 ; RPD < 3), les SECV, SEL/SECV et CV étaient du même ordre que ceux mesurés pour le modèle 'laboratoire'. L'amélioration du modèle N 'bord de bâtiment' peut s'envisager avec une nouvelle collecte pour augmenter le nombre d'échantillons, élaborer des modèles en mPLS (et non plus seulement en MLR), et étendre la gamme de valeurs. Le nombre d'échantillons et la SD du jeu 'bord de bâtiment' sont en effet égaux à environ la moitié de ceux mesurés sur le jeu de donnée 'laboratoire' (tableau 2, figure 7).

Globalement, les performances des modèles développés sur les litières de poulet de chair étaient meilleures que celles observées pour les modèles développés sur les autres effluents étudiés dans le cadre plus large du projet CasDAR évoqué en introduction (Thuriès et al. 2013).

■ Figure 6 — Teneurs en MS (en g 100g⁻¹ PB) mesurées par la méthode de référence et prédites par SPIR.



■ Figure 7 — Teneurs en N et N-NH₄ (en g 100g⁻¹ MS) mesurées par la méthode de référence et prédites par SPIR.



4. Conclusions

A partir de collectes de litières de poulet de chair effectuées dans les grandes régions d'élevage avicole en métropole et à la Réunion, cette étude a montré qu'il était possible d'utiliser l'outil spectroscopie dans le proche infrarouge pour développer des modèles intéressants — en termes de rapidité d'obtention du résultat et précision de la donnée prédite —, pour la prédiction des teneurs en matière sèche, azote et ammonium qui caractérisent en partie le potentiel agronomique de ces effluents à l'état frais. Cela n'a été possible qu'en respectant des procédures communes d'échantillonnage, de conservation, de préparation des échantillons, d'acquisition des spectres, de correction des interférences spectrales dues aux différents accessoires utilisés par les partenaires et la standardisation des réponses spectrales des différents spectromètres proche infrarouge utilisés. Les modèles développés pour prédire la teneur en matière sèche des litières scannées à l'état frais au laboratoire après homogénéisation au broyeur alimentaire, et même des litières scannées à l'état frais en bord de bâtiment après une homogénéisation manuelle sommaire, peuvent être considérés comme aussi performants que l'analyse de référence effectuée au laboratoire. L'écart-type résiduel de la prédiction de la teneur en azote des litières à l'état frais homogénéisées au broyeur alimentaire n'est que deux à trois fois plus élevée que celle reportée pour des litières séchées et broyées finement. Ce résultat remarquable peut représenter une alternative intéressante à l'analyse de l'azote par la méthode de référence (coûteuse, longue et nécessitant des produits chimiques dont l'utilisation et l'élimination demandent des précautions). Les autres modèles développés pour prédire les teneurs en azote et ammonium des litières à l'état frais sont bons. Même si l'effectif des litières scannées en « bord de bâtiment » était deux fois moins important que celui des litières scannées au laboratoire, la caractérisation des litières chez l'exploitant à l'aide d'un spectromètre proche infrarouge portable s'avère prometteuse. Que ce soit au laboratoire ou en bord de bâtiment, la spectroscopie proche infrarouge semble être un bon candidat pour fournir rapidement et avec un bon niveau de performance des informations d'intérêt qui peuvent être utilisées comme données d'entrée dans les outils d'aide à la décision pour la gestion des effluents avicoles.

Soutiens financiers

Ce travail a été soutenu financièrement en partie par le Ministère de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Pêche (Projet CasDar n°9109), et l'ADEME (convention n°0906C0033). Une partie des travaux du Cirad ont été soutenus à la Réunion par la Région Réunion (convention n°20090885) grâce au Fonds Européen de Développement Régional.

Références bibliographiques

Ait Aissa H (2012) Améliorer la prévision de la composition des effluents d'élevage par l'utilisation d'une méthode innovante : la spectroscopie proche infrarouge. Master 2 Opex. Université Bretagne Ouest, Brest.

Barnes RJ, Dhanoa MS, Lister SJ (1989) Standard Normal Variate Transformation and De-trending of Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectra Applied Spectroscopy 43: 772-777.

Bastianelli D, Lescoat P, Bouvarel I, Catherine H (2007a) Analyse des composés azotés des fumiers de volaille de chair par Spectrométrie dans le Proche Infra-Rouge (SPIR); application à l'étude de la variabilité intra- et inter-élevage. In: ITAVI (ed) Septièmes Journées de la Recherche Avicole. ITAVI, Tours, France.

Bastianelli D, Lescoat P, Bouvarel I, Catherine H (2007b) Analyse des composés azotés des fumiers de volaille de chair par Spectrométrie dans le Proche Infra-Rouge (SPIR); application à l'étude de la variabilité intra- et inter-élevage. In: ITAVI (ed) Septièmes Journées de la Recherche Avicole. ITAVI, Tours, France.

Bastianelli D., Bonnal L., Juin H., Mignon-Grasteau S., Davrieux F., B. C (2010) Prediction of the chemical composition of poultry excreta by near infrared spectroscopy. J Near Infrared Spectrosc 18: 69-77.

Chaballier P-F, Van de Kerchove V, Saint Macary H (2006) Guide de la fertilisation organique à La Réunion. CA974, Saint Denis.

Chen LJ, Xing L, Han LJ (2009) Quantitative determination of nutrient content in poultry manure by near infrared spectroscopy based on artificial neural networks. Poultry Science 88: 2496-2503. doi: 10.3382/ps.2009-00210.

Cozzolino D, La Manna A, Vaz Martins D (2002) Use of near infrared reflectance spectroscopy to analyse bovine faecal samples. J Near Infrared Spectrosc 10: 309-314.

Dagnew MD, Crowe TG, Schoenau JJ (2004) Measurement of nutrients in Saskatchewan hog manures using near-infrared spectroscopy. Canadian Biosystems Engineering 46: 33-37.

Malley DF, Yesmin L, Eilers RG (2002) Rapid analysis of hog manure and manure-amended soils using Near-infrared spectroscopy. Soil Science Society of America Journal 66: 1677-1686.

Reeves JB, Van Kessel JAS (2000) Determination of ammonium-N, moisture, total C and total N in dairy manures using a near-infrared fibre-optic spectrometer. J Near Infrared Spectrosc 8: 151-160.

Rottatinti T (2010) Caractérisation du potentiel agronomique des litières de volailles à la Réunion : intérêt de la spectroscopie proche infrarouge. DUT Génie biologique option Industries Alimentaires et Biologiques (IAB) Université de la Réunion., Saint Pierre de la Réunion.

Rousseau A (2008) Projet INCIVOL974. Valorisation énergétique des litières de volaille par combustion. VCAT. Cirad-Avipôle.

Shenk JS, Westerhaus MO (1991) Population definition, sample selection, and calibration procedure for near infrared reflectance spectroscopy. Crop Science 31: 469-474.

Sinnaeve G, Dardenne P, Agneessens R, Biston R (1994) The use of near infrared spectroscopy for the analysis of fresh grass silage. J Near Infrared Spectrosc 2: 79-84.

Tasistro AS, Shaaban S, Kissel DE, Vendrell PF (2003) Near-infrared reflectance spectroscopy for the analysis of water and total nitrogen contents in poultry litter. Communications in Soil Science and Plant Analysis 34: 1367-1379.

Thuriès L, Aubert S, Aït Aïssa H, Bastianelli D, Bonnal L, Damay N, Dardenne P, Davrieux F, Ducept H, Fouad Y, Le Roux C, Morvan T, Moussard G, Moureau A, Nabeneza S, Parnaudeau V, Trupin S, Valé M (2012) Améliorer la prévision de la composition des principaux effluents d'élevage en France par l'utilisation de la SPIR ; standardiser pour partager. In: F Davrieux (ed) 13èmes Rencontres Héliospir "La métrologie de la spectroscopie PIR Mieux mesurer les spectres". Héliospir, Montpellier (France).

Thuriès L, Aubert S, Bastianelli D, Bonnal L, Damay N, Davrieux F, Ducept H, Fouad Y, Le Roux C, Morvan T, Moussard G, Parnaudeau V, Trupin S, Valé M, Aït Aïssa H, Bazot A, Rottatinti T, Dardenne P (2013) The use of near infrared spectroscopy (NIRS) to better assess livestock effluents composition. A national experience. In: INRA (ed) 15th RAMIRAN international conference 'Recycling of organic residues for agriculture: from waste management to ecosystem services', Versailles (France).