



La revue francophone sur les fourrages et les prairies

The French Journal on Grasslands and Forages

Cet article de la revue **Fourrages**,
est édité par l'Association Francophone pour les Prairies et les
Fourrages

Pour toute recherche dans la base de données
et pour vous abonner :

www.afpf-asso.fr



AFPF - Maison Nationale des Eleveurs - 149 rue de Bercy - 75595 Paris Cedex 12
Tel. : +33.(0)1.40.04.52.00 - Mail : contact@afpf-asso.fr

Association Francophone pour les Prairies et les Fourrages

La spectrométrie dans le proche infra-rouge pour évaluer la valeur alimentaire des fourrages

C. Barotin¹, L. Bonnal^{2,3}, D. Andueza⁴, S. Maudemain⁵, J. Jost⁶, H. Caillat⁷, L. Julien^{2,3}, X. Juanes^{2,3}, M. Lesnoff^{2,3}, M.H. Assouma^{3,8}, F. Picard⁴, N. Fumat⁵, H. El Radi⁵, P. Barre¹

RESUME

La spectrométrie dans le proche infra-rouge (SPIR ou NIRS en anglais) permet d'évaluer la valeur nutritive des fourrages et même leur valeur alimentaire si elle est appliquée sur du matériel frais. En effet, elle permet d'estimer les teneurs en matière azotée, en cellulose brute (ou en parois ou en ligno-cellulose) en matière organique et en matière sèche ainsi que la digestibilité cellulaire. Ces données sont utilisées pour la prévision de la valeur alimentaire des fourrages (Unités Fourragères : UF, Protéines Digestibles dans l'Intestin: PDI et Unités d'Encombrement: UE) à partir de l'utilisation de différents modèles de régression. Les estimations SPIR reposent sur l'établissement d'une relation entre les valeurs obtenues par une méthode de référence et les données d'absorbance spectrale. Une base d'étalonnage est ainsi construite et doit correspondre à la diversité des échantillons analysés. Pour cela, elle est complétée régulièrement en y ajoutant des points « atypiques ». Une diversité croissante de fourrages est utilisée en agriculture pour faire face aux aléas climatiques et à la volonté de diminuer les intrants. En particulier, de plus en plus de mélanges d'espèces sont utilisés sous différentes formes : en vert, en foin ou en ensilage. Cette diversité nécessite la collecte des spectres d'absorption et l'analyse chimique de plusieurs centaines voire de plusieurs milliers d'échantillons. Face à ces contraintes, le CIRAD et l'INRAE ont fait le choix d'une démarche de mutualisation de leurs bases fourragères respectives et de pouvoir donc profiter collectivement de la diversité de chacun. Ceci a été possible grâce à une standardisation des analyses chimiques de référence et des spectres d'absorbance entre laboratoires. Cette méthode, non destructive et peu coûteuse tend vers une évolution des appareils qui se miniaturisent et permet une analyse dans les exploitations. Les avancées dans ce domaine sont discutées dans cet article.

SUMMARY

Near infrared spectrometry to evaluate the feed value of forages

Near Infrared Spectrometry (NIRS) is used to evaluate the nutritional value of forages and even their feed value if applied to fresh material. Indeed, it allows to estimate the contents of nitrogenous matter, crude cellulose (or walls or ligno-cellulose), organic matter and dry matter as well as the cellulase digestibility. These data are used to predict the feed value of forages (Forage Units: FU, Digestible Protein in the Intestine: DPI, and Bulking Units: BU) using different regression models. The NIRS estimates are based on the establishment of a relationship between the values obtained by a reference method and the spectral absorbance data. A calibration base is thus built and must correspond to the diversity of the analyzed samples. For this, it is regularly completed by adding "atypical" points. An increasing diversity of forages is used in agriculture to cope with climatic hazards and the desire to reduce inputs. In particular, more and more species mixtures are used in different forms: green, hay or silage. This diversity requires the collection of absorption spectra and the chemical analysis of several hundred or even several thousand samples. Faced with these constraints, CIRAD and INRAE have chosen to pool their respective forage databases and thus benefit collectively from the diversity of each. This was possible thanks to a standardization of chemical reference analyses and absorbance spectra between laboratories. This method, non-destructive and inexpensive, tends towards an evolution of the devices which become miniaturized and allows an analysis in the farms. The advances in this field are discussed in this article.

AUTEURS

- 1 : INRAE, UR004, P3F, Le Chêne, RD150, CS80006, 86600, Lusignan, France. charlene.barotin@inrae.fr
- 2 : CIRAD, UMR SELMET, F-34398 Montpellier, France.
- 3 : SELMET, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.
- 4 : INRAE, Université Clermont Auvergne, Vetagro Sup, UMRH, 63122, Saint-Genès-Champanelle, France.
- 5 : ARVALIS-Institut du végétal, Service Qualité et Valorisation, Pôle Analytique, Station expérimentale, 91720 Boigneville, France.
- 6 : IDELE, Institut de l'élevage, CS 45002 - 86550 Mignaloux Beauvoir, France.
- 7 : INRAE, Unité Expérimentale Fourrages, Ruminants et Environnement, FERLUS, Les Verrines, 86600, Lusignan, France.
- 8 : CIRAD, UMR SELMET, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.

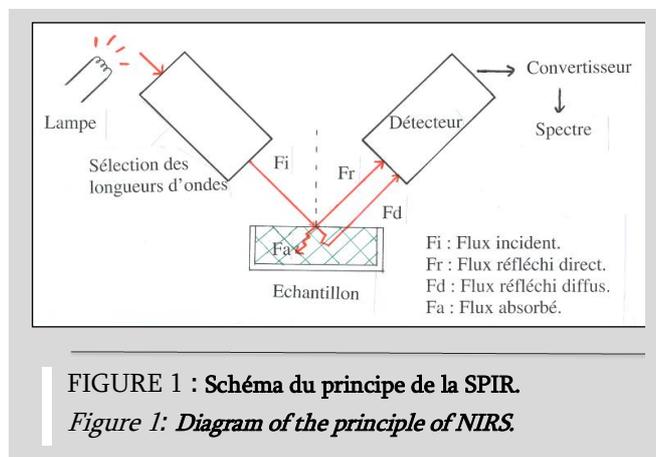
MOTS-CLES : Spectrométrie dans le proche infra-rouge ; valeur alimentaire des fourrages ; absorption spectrale ; composition biochimique ; diversification des fourrages

KEY-WORDS: Near infrared spectrometry; feed value of forages; spectral absorption; biochemical composition; forage diversification

REFERENCE DE L'ARTICLE : Barotin C., Bonnal L., Andueza A., Maudemain S., Jost J., Caillat H., Julien L., Juanes X., Lesnoff M., Assouma M.H., Picard F., Fumat N., El Radi H., Barre P., (2021). « La spectrométrie dans le proche infra-rouge pour évaluer la valeur alimentaire des fourrages ». *Fourrages* 247, 41-49

La SPIR permet d'estimer la digestibilité cellulaire, les teneurs en ligno-cellulose (ADF), en matières azotées totales (MAT), en matières minérales (MM) et en matière sèche (MS) des fourrages (Bastianelli et al., 2018). Les valeurs obtenues peuvent donc être utilisées pour prévoir la valeur alimentaire des fourrages à l'aide des modèles de régression appropriés ou d'INRATON (<https://www.inration-ruminal.fr/>) qui dépendent entre autres de l'espèce fourragère, du stade de récolte, du mode de conservation et de l'animal (Agabriel et al., 2018). L'utilisation de la SPIR permet de réduire considérablement les coûts et le temps d'analyse par rapport à des analyses en chimie analytique.

La SPIR repose sur l'absorption différentielle des différentes longueurs d'onde de la lumière par la matière organique (Figure 1). Cette absorption est liée à la composition chimique des échantillons. Le domaine spectral s'étend de 800 à 2500 nanomètres (nm). C'est une méthode non destructive.



Les estimations SPIR reposent sur l'établissement d'une relation entre les valeurs obtenues par une méthode de référence et les données d'absorbance spectrale permettant la création d'une équation basée sur des modèles mathématiques (le plus souvent des régressions des moindres carrés partiels PLS). La qualité de l'équation repose donc sur une base de données à la fois de références et de spectres d'absorptions représentative de la diversité des échantillons inconnus à analyser. **Une base d'étalonnage doit donc être entretenue régulièrement en y ajoutant des points « atypiques »** sans pour autant que ceux-ci soient trop différents de la population initiale ce qui nécessiterait la création d'une autre équation.

Concernant la digestibilité cellulaire et la composition biochimique (ADF, MAT, MM) des fourrages, les laboratoires d'analyse dont ceux de l'INRAE et du CIRAD disposent de plusieurs équations en fonction du fourrage analysé : légumineuses fourragères pérennes, graminées fourragères pérennes tempérées ou tropicales, mélanges graminées-légumineuses. Aujourd'hui, avec l'augmentation des aléas dus au changement climatique et à la diminution

de l'utilisation des intrants, **on observe une augmentation de la diversité des fourrages avec un nombre croissant d'espèces de plus en plus utilisées en mélange** (Litrico et al., 2016). Ceci est observé au niveau des prairies mais aussi des cultures comme les méteils. La diversité des fourrages issus de ces mélanges croît de manière exponentielle avec le nombre de constituants. De plus, le fourrage peut être collecté à différents stades de développement des différents constituants et valorisé sous différentes formes : en vert (pâturage ou affouragement vert), foin et ensilage dont l'enrubannage. Afin d'estimer la digestibilité et la composition de ces fourrages complexes, il est indispensable de créer des équations SPIR adaptées. D'autre part, afin de valoriser au mieux les fourrages produits sur la ferme il serait intéressant de mesurer la valeur des fourrages directement dans les exploitations. Pour cela, il est nécessaire de bénéficier d'appareils SPIR portatifs capables d'analyser des échantillons non broyés et éventuellement non séchés ainsi que de la méthodologie adaptée à la réalisation de la mesure.

Nous présentons ici (1) les avancées pour la création de nouvelles équations sur des fourrages complexes, (2) une stratégie de construction d'une base de données très large associée à des estimations à partir de sous-groupes d'échantillons (locale) pour prendre en compte la diversité croissante des fourrages et (3) les avancées concernant les analyses SPIR dans les exploitations.

1. De nouvelles équations pour des fourrages complexes

1.1. Exemple des foins et des ensilages

Une utilisation correcte de la SPIR nécessite une base de données de référence et spectrales obtenues sur des échantillons proches biochimiquement des échantillons à analyser. Les fourrages les plus fréquemment utilisés pour la constitution de ces bases de données sont des fourrages verts séchés et broyés. Cependant, il serait souhaitable de pouvoir aussi utiliser la SPIR pour analyser des échantillons de foin et d'ensilage, eux aussi séchés et broyés. Afin de valoriser les données déjà acquises sur fourrages verts, Andueza et al. (2016) ont démontré **qu'il est possible d'obtenir des estimations de la composition chimique et de la digestibilité cellulaire des foins en utilisant des modèles créés à partir d'une base de données de fourrages verts**. Ces deux types de fourrages pourraient donc être utilisés ensemble dans la même base de données. Cependant, **l'estimation des ensilages à partir de la même base de fourrages verts n'a pas été possible** car la distance spectrale (distance de Mahalanobis) entre les deux types de fourrages était très élevée. Ces résultats indiquent que les changements produits au cours du processus d'ensilage sont plus importants que ceux qui se sont produits pendant la

fenaison. La principale différence entre les spectres des fourrages verts et des mêmes fourrages ensilés a été observé à 1992 nm ce qui est en relation avec l'absorbance des sucres solubles (Osborne et Fearn, 1998). En ce qui concerne les fourrages fanés, des changements au niveau de la couleur ont été observés par rapport aux fourrages verts, mais dans le segment infrarouge, les différences spectrales dues au processus de conservation restent négligeables.

Constituants	N	Moy	STD	SECV	R ²	RPDcv
ADF	867	28,37	5,93	0,99	0,97	5,97
Digestibilité cellulase	1606	70,60	9,94	2,32	0,94	4,28
MAT	1474	16,07	4,90	0,69	0,98	7,09
MM	1179	10,72	3,07	0,80	0,92	3,85

TABLEAU 1 : Caractéristiques de l'équation SPIR INRAE UR3F sur fourrages verts séchés et broyés issus de mélanges graminées-légumineuses.

N: nombre d'échantillons; Moy: moyenne des valeurs chimiques; STD: écart type des valeurs chimiques; SECV: écart type de cross-validation; R²: coefficient de détermination; RPDcv: STD / SECV; ADF: teneur en ligno-cellulose, MAT: matières azotées totales; MM: matières minérales

Table 1: Characteristics of the INRAE UR3F NIRS equation on dried and ground green forages from grass-legume mixtures.

Ces résultats obtenus sur les foins ont été corroborés sur une large gamme de prairies multi-espèces dans le cadre du projet PSDR FLECHE. L'UR3F a créé une équation basée sur des fourrages verts issus de mélanges d'espèces fourragères semées (Tableau 1). Cette équation basée sur un grand nombre d'échantillons, recouvre une large gamme de diversité et

Constituants	sans foins			avec foins		
	R ²	pente	biais	R ²	pente	biais
ADF	0,97	1,04	-3,35	0,97	1,04	0,69
Digestibilité cellulase	0,95	0,96	3,12	0,95	1,06	0,08
MAT	0,98	0,96	-0,61	0,98	0,97	-0,35
MM	0,76	0,85	0,39	0,76	0,86	0,32

TABLEAU 2 : Caractéristiques de la régression linéaire entre les estimations SPIR avec l'équation initiale basée sur échantillons verts (sans foins) ou avec l'équation initiale enrichie d'échantillons de foins (avec foins) et les données de référence sur des échantillons de foins broyés et séchés.

ADF: teneur en ligno-cellulose, MAT: matières azotées totales; MM: matières minérales

Table 2: Characteristics of the linear regression between NIRS estimates with the initial equation based on green samples (without hay) or with the initial equation enriched with hay samples (with hay) and reference data on ground and dried hay samples.

présente une qualité d'estimation élevée (faible SECV et fort R²), la rendant très utile (RPDcv >3). Sa robustesse a été démontrée sur une large gamme d'échantillons provenant de prairies variées d'éleveurs (non présenté). De plus, elle a été utilisée sur une soixantaine de foins issus de prairies variées d'éleveurs. Il ressort une bonne qualité d'estimation avec un biais conséquent pour la digestibilité cellulase (Figure 2, Tableau 2). Ce biais est corrigé par l'intégration de quelques données (47) de chimie analytique sur les foins de plusieurs années (2015 à 2020) dans l'équation (Figure 2, Tableau 2).

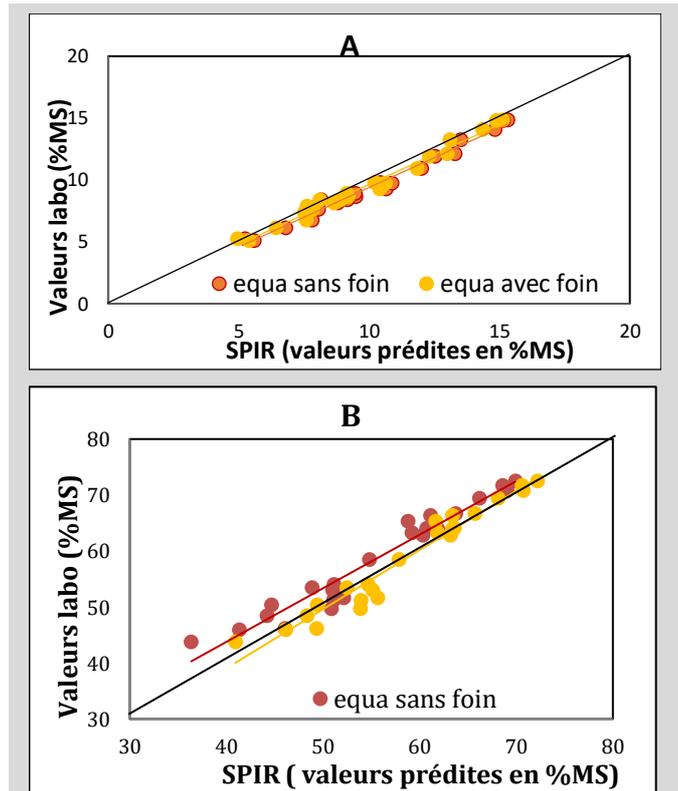


FIGURE 2 : Relation entre les valeurs prédites en SPIR et les valeurs de référence du laboratoire pour les matières azotées totales (A) et la digestibilité cellulase (B). Estimations SPIR avec l'équation initiale basée sur échantillons verts (equa sans foins) ou avec l'équation initiale enrichie d'échantillons de foins (equa avec foins).

Figure 2: Relationship between NIRS predicted values and laboratory reference values for total nitrogenous matter (A) and cellulase digestibility (B).

1.2. Exemple des méteils

Actuellement, il existe un intérêt croissant pour l'utilisation de fourrages plus complexes que les fourrages mono-spécifiques telles que les prairies multi-spécifiques, les prairies permanentes et les méteils *i.e.* mélanges d'une ou plusieurs céréales (blé, seigle, orge...) avec une ou plusieurs légumineuses (pois fourrager, vesce, féverole...). Ces fourrages, constitués de plusieurs espèces issues de différentes familles, se caractérisent

par une forte variabilité. Le choix d'échantillons représentatifs est essentiel. De plus, il existe une forte variabilité au sein des échantillons qui peut être gérée par un broyage complet de l'ensemble de l'échantillon suivi d'un sous échantillonnage après mélange ou par la prise de plusieurs spectres qui seront moyennés (voir partie 3.1).

Concernant les métaux, les analyses chimiques peuvent différer de celles classiquement utilisées pour les fourrages issus de prairies. Par exemple, pour la détermination de la teneur en parois, certains échantillons de métaux peuvent contenir de l'amidon et nécessitent l'utilisation de l'enzyme amylase ce qui n'est pas le cas classiquement. Il se pose alors la question de quelles bases de données constituer pour créer les équations SPIR : une base globale ou plusieurs bases selon les types de métaux et leur stade de récolte. Cette dernière option semble difficilement réalisable et onéreuse. Une option pourrait être d'utiliser une base de données très large mais avec des équations différentes pour chaque échantillon réalisé à partir des échantillons qui lui sont biochimiquement proches *i.e.* équations « locales » (Andueza *et al.*, 2011; Andueza *et al.*, 2016).

Malgré ces difficultés, des équations préliminaires réalisées sur des métaux récoltés en vert ont donné des résultats encourageants à l'URP3F. L'estimation de la teneur en matières azotées, parois cellulaires et pour la digestibilité cellulase obtenus sur 150 échantillons montrent des valeurs de $R^2 > 0,90$ et des valeurs de SECV de 0,92 % MS, 1,85 % MS et 1,92 % MS, respectivement. Ces résultats sont à confirmer en augmentant le nombre d'échantillons afin d'intégrer la diversité spécifique des métaux et leur stade de récolte.

Une difficulté supplémentaire subsiste pour obtenir la valeur nutritive des métaux à partir de la digestibilité cellulase et de la composition chimique. Les modèles utilisés pour la prévision de la digestibilité de la matière organique *in vivo* à partir de la digestibilité cellulase sont différents pour les graminées et pour les légumineuses (Aufrère *et al.*, 2007). Cependant, en attendant l'obtention de modèles adaptés aux mélanges, il est possible d'estimer la valeur nutritive d'un mélange en utilisant sa digestibilité cellulase et sa composition biochimique en connaissant la proportion de graminées et de légumineuses (Ferard *et al.*, 2018). Aujourd'hui, des équations existent pour prédire cette proportion graminées/légumineuses sur des fourrages issus de prairies multi-espèces (Bastianelli *et al.* 2018), mais pas encore pour les métaux.

2. Stratégie de prévision à distance avec une base commune

Le CIRAD et plus particulièrement l'unité mixte de recherche « Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux » (Selmet) développe depuis plusieurs années une stratégie de « réseau SPIR ». Celle-ci permet un accès à des ressources spectrales fourragères

diversifiées issues d'échantillons provenant principalement de l'océan indien et d'Afrique. Actuellement dans le cadre de projets financés par l'initiative européenne DeSIRA (projets ACCEPT et CaSSECS), l'UMR Selmet ambitionne la mise à disposition de spectrophotomètres proche infrarouge dans les instituts du sud partenaires notamment à l'ISRA (Sénégal), à l'INERA (Burkina Faso) et à l'IREC (Tchad). Cette initiative envisage à terme **l'harmonisation des protocoles d'analyse SPIR et une optimisation des synergies possibles dans les répartitions des analyses de laboratoire entre les différents partenaires**. Outre l'appui à l'acquisition d'équipement SPIR, l'UMR Selmet apporte un appui scientifique en chimométrie à ses partenaires qui seraient dépourvus de compétences en interne dans le développement de leurs propres étalonnages.

Cette stratégie se base sur :

- Equiper/aider à équiper les partenaires en SPIR.
- Former à la prise de spectres
- Former à l'analyse des données SPIR (modèle de prévision : étalonnage et validation).
- Accompagner dans le suivi du spectromètre
- Mettre en place un réseau de partage entre les différents partenaires

Ce travail en réseau entre l'UMR Selmet et ses partenaires du sud permettra au fil du temps d'enrichir la base de données de références conservée au CIRAD à Montpellier, par l'acquisition de données sur des échantillons d'espèces végétales absentes ou sous représentées malgré les collectes régulières depuis ces vingt dernières années.

Pouvoir estimer par SPIR une grande diversité de fourrages, c'est avoir la capacité d'accéder à un catalogue de ressources spectrales fourragères diverses (différentes espèces, différents climats, différents intrants, etc.) associées à leurs valeurs de digestibilité cellulase et de composition chimique. Cependant, la constitution d'une telle base spectrale diversifiée reste compliquée et onéreuse. **Elle nécessite la collecte de spectres et l'analyse chimique de plusieurs centaines voire de plusieurs milliers d'échantillons**. Face à ces contraintes, **le CIRAD et l'INRAE ont fait le choix d'une démarche de mutualisation de leurs bases fourragères** respectives et de pouvoir donc profiter collectivement de la diversité de chacun. Ceci a été possible grâce à une standardisation des analyses chimiques de référence et des spectres d'absorption entre laboratoires.

Cette stratégie de « réseau SPIR » et de partage a permis la création d'une plateforme de prévision SPIR en ligne, DoPredict. Cette plateforme Web de prévisions permet de lever les contraintes de coût et de temps (résultats en temps réel) tout en conservant une qualité de résultat équivalente. Ce service assure des prévisions en temps réel et une disponibilité 24h/24h *via* des

procédures automatisées et autonomes avec des données conservées dans les serveurs sécurisés du CIRAD à Montpellier.

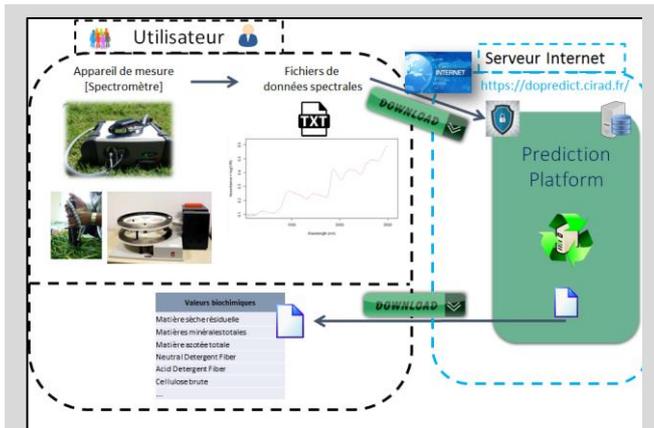


FIGURE 3 : Schéma fonctionnel de la plateforme de prévision en ligne DoPredict (CIRAD, UMR Selmet).

Figure 3 : Functional diagram of the online forecasting platform DoPredict (CIRAD, UMR Selmet).

Le mode de fonctionnement de cet outil est simple (Figure 3) et ne nécessite pas de connaissances spécifiques en chimiométrie et/ou en spectrophotométrie. Les différents utilisateurs (équipes de recherche nord et sud, organismes techniques professionnels, etc.) téléchargent leur fichier de données issues des mesures spectrales de leurs échantillons de fourrages en indiquant les espèces concernées et le mode de conservation. En retour, ils obtiennent un fichier de résultats contenant des valeurs prédites de la composition chimique (taux de matière sèche, de protéines, de fibres, etc.) et qui peuvent être exploitées pour des calculs de valeurs nutritives. La prévision est obtenue grâce aux bases spectrales mutualisées du CIRAD et de l'INRAE et d'un algorithme de calcul basé sur une méthode « locale » de régression développée par l'UMR Selmet (Lesnoff, 2020).

La base de données originale détenue par l'UMR Selmet (CIRAD) sur les fourrages contient plus de 13 000 spectres d'échantillons référencés acquis sur plus de 20 ans et constituée principalement d'espèces fourragères tropicales collectées dans près de 50 pays du monde. La base de données de l'INRAE est constituée de près de 10 000 spectres d'échantillons d'espèces fourragères tempérées collectées en France métropolitaine provenant de deux équipes de recherches l'URP3F à Lusignan et l'UMRH à Theix.

Outre les gains financiers et de temps, la plateforme s'inscrit dans une démarche écoresponsable en limitant l'utilisation des réactifs chimiques et l'acheminement d'échantillons vers les laboratoires d'analyse compétents. Elle permet aux partenaires du sud du CIRAD de développer des laboratoires d'analyses en utilisant la SPIR d'une part, dans un contexte où l'obtention de réactifs chimiques reste coûteuse et très

difficile et d'autre part, dans un contexte où il est également de plus en plus difficile de faire voyager des échantillons pour des raisons sanitaires ou réglementaires.

Cette stratégie initialement développée pour la caractérisation des plantes fourragères peut servir de démarche « pilote » à d'autres domaines tels que les fèces, les plantes vivrières, les sols, etc. De plus, elle peut permettre au niveau opérationnel une grande réactivité pour proposer des plans d'optimisation des systèmes d'alimentation des élevages grâce à une caractérisation en temps réel des fourrages et de leur valeur nutritive.

3. Des mesures dans les exploitations

3.1. Echantillonnage et prise de spectres

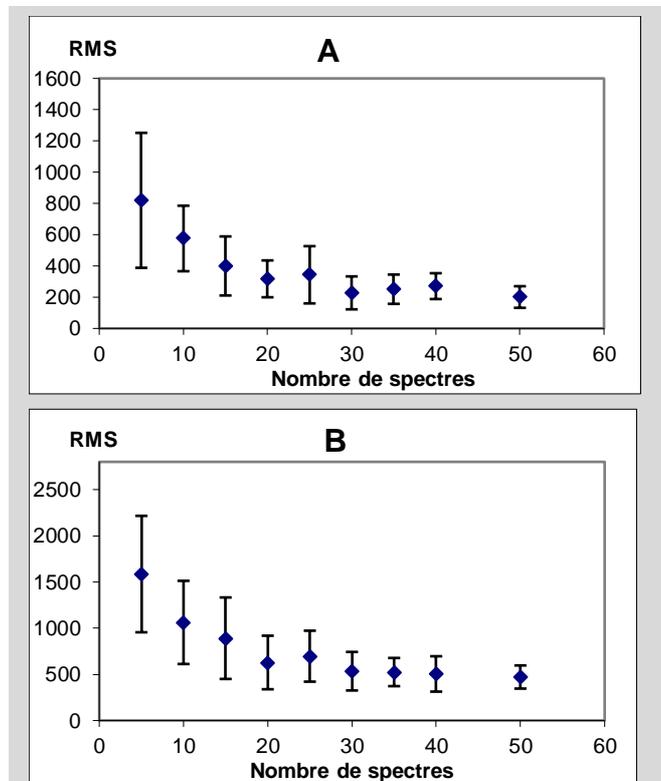


FIGURE 4 : Ecart moyen (Root Mean Square : RMS en ordonnées) entre un spectre « idéal » obtenu à partir de 500 spectres élémentaires sur un échantillon de fourrage vert non broyé de graminées et un spectre obtenu à partir d'un nombre variable de spectres élémentaires (en abscisses) sur le même échantillon pour une gamme spectrale de 1001 à 1800 nm (A) et de 1801 à 2500 nm (B).

Figure 4 : Average deviation (Root Mean Square: RMS in ordinates) between an "ideal" spectrum obtained from 500 elemental spectra on a sample of unmilled green grass forage and a spectrum obtained from a variable number of elemental spectra (in abscissa) on the same sample for a spectral range of 1001 to 1800 nm (A) and 1801 to 2500 nm (B).

Pour que les analyses SPIR dans les exploitations à l'aide d'un appareil portatif soient pertinentes dans l'établissement des rations, il est essentiel de réaliser un échantillonnage représentatif des fourrages utilisés. Par exemple pour analyser une botte de foin il faudra mesurer l'absorbance à plusieurs endroits dans la botte. De plus, sur le terrain il n'est pas possible d'homogénéiser l'échantillon par broyage, d'où l'importance de réaliser plusieurs mesures de spectres afin de prendre en compte l'hétérogénéité de l'échantillon. Par exemple, avec l'appareil LabSpec ASD (Eric Becourt, Bonsai advanced technologies), il faut réaliser entre 30 et 40 mesures à divers endroits de l'échantillon vert non broyé de fourrage de graminées, pour avoir une bonne représentativité (Figure 4) (Liausson, 2013). Un autre paramètre est à prendre en compte lorsque l'on travaille sur des échantillons frais et non broyés, il s'agit de l'eau. Cette dernière peut limiter le développement d'équations pour certains composants.

3.2. Une gamme d'appareils pour différents usages

De nombreux appareils SPIR portatifs existent avec des caractéristiques et des prix variables. En particulier, le prix est fonction de la gamme spectrale analysée, de la résolution et de la sensibilité. Un appareil comme le LabSpec ASD, dont la gamme spectrale s'étend de 350 à 2500 nm, qui coûte quelques dizaines de milliers d'euros donne des résultats équivalents à ceux obtenus sur des appareils de laboratoire comme le FOSS 6500/XDS ou le MPA de Bruker. L'AgriNIR, largement utilisé dans les exploitations, coûte moins cher (quelques milliers d'euros) mais présente une gamme spectrale plus réduite (1100-1800 nm). D'autres appareils, pilotés par smartphone, comme le SCIO (Consumer Physics) ou le Tellspec (Tellspec Inc.), encore moins onéreux (quelques centaines d'euros) sont très portables mais présentent une gamme spectrale plus réduite (740 – 1070 nm pour le SCIO et 900 – 1700 nm pour le Tellspec) et une résolution spectrale variable (1 nm pour le SCIO et 12 nm pour le Tellspec). Le choix de l'appareil va dépendre des caractéristiques à mesurer (MS, MAT, digestibilité cellulase) et de l'utilisation des données estimées, en particulier de la précision souhaitée. Par exemple, des données très précises sont nécessaires pour différencier deux variétés en expérimentation en parcelle et seront obtenues sur matériel broyé au laboratoire alors que l'évaluation de différents foins dans une exploitation pour réaliser une ration nécessitera de nombreuses mesures spectrales pour prendre en compte l'hétérogénéité du foin mais avec une moins grande précision.

Un premier exemple d'application de la spectrométrie utilisant des spectrophotomètres portables est celui du laboratoire des fourrages de l'ARP (Association Réunionnaise de Pastoralisme) qui offre le service d'analyser la valeur alimentaire des fourrages de

la Réunion par SPIR en utilisant le spectrophotomètre portable LabSpec 4 de la **marque ASD** et en se basant sur des étalonnages SPIR du CIRAD (UMR Selmet). Les prévisions sur fourrage frais de la teneur en MAT et de la digestibilité cellulase sont de très bonne qualité avec des R^2 supérieurs à 0.91 (Salgado *et al.*, 2013). L'analyse de la composition chimique peut être réalisée sur fourrages frais ou séché pour plus de précisions. Les valeurs ainsi estimées permettent de prévoir la valeur alimentaire des fourrages. De même, la chambre d'agriculture de Guyane est en train de mettre en place la même démarche en collaboration avec le CIRAD dans le cadre d'un projet européen Guya-Pâture.

Un deuxième exemple concerne le spectrophotomètre AgriNIR. Dans le cadre du projet PSDR FLECHE, une comparaison a été réalisée entre des mesures obtenues avec 2 appareils AgriNIR sur des échantillons non broyés de foin de luzerne (AgriNIR de Copavenir Poitiers et AgriNIR de Touraine Conseil Elevage à Tours). Ces échantillons provenaient directement d'élevages caprins de la Vienne et des Deux Sèvres (réseau RedCap). Une attention particulière a été apportée pour échantillonner de manière homogène en incluant des feuilles et des tiges. Une fois les mesures réalisées sur les appareils AgriNIR les échantillons ont été broyés avec un broyeur Gondard avec une grille de 1mm puis analysé au laboratoire sur l'appareil SPIR MPA de Bruker à l'INRAE de Lusignan.

Constituants	R ²	pente	biais
ADF	0,49	0,68	- 0,15
Digestibilité cellulase	0,73	0,72	- 1,98
MAT	0,40	0,62	0,71
MM	0,33	0,65	- 1,23

TABLEAU 3 : Caractéristiques de la régression linéaire entre deux appareils AgriNIR (Copavenir de Poitiers et Touraine Conseil Elevage) sur de 69 échantillons de foin de luzerne non broyés.

ADF : teneur en ligno-cellulose, MAT : matières azotées totales ; MM : matières minérales

Table 3 : Characteristics of the linear regression between two AgriNIR instruments (Copavenir de Poitiers and Touraine Conseil Elevage) on 69 samples of uncrushed alfalfa hay.

La comparaison entre les deux appareils AgriNIR montre des valeurs de coefficient de détermination (R^2) variables selon les constituants de 0,33 à 0,73 avec des biais qui peuvent être importants (Tableau 3). La comparaison des appareils **AgriNIR** avec le MPA est présentée dans le tableau 4 et la figure 5. Pour la MAT et l'ADF on observe une pente proche de 1 et un R^2 moyen. Pour ces deux constituants, les appareils AgriNIR permettent donc de classer les échantillons de manière relativement correcte avec une valeur absolue proche de l'attendue. La digestibilité cellulase (en %MS) estimée par l'AgriNIR (Tours : min 55,5-max 65,4 ; Poitiers : min 56,4-max 67,8) ne permet pas de prendre en compte la variabilité des échantillons observée avec

la prévision par le MPA (Lusignan : min 52,2-max 76,8). Cependant la moyenne des échantillons observée avec l'AgriNIR (Tours : 62,6, Poitiers : 64,6) est proche de la moyenne observée avec le MPA (62,8). On retrouve le même résultat avec les teneurs en matières minérales (Tableau 4).

Constituants	Poitiers/Lusignan			Tours/Lusignan		
	R ²	pente	biais	R ²	Pente	biais
ADF	0,19	1,14	-2,03	0,15	1,18	-0,02
Digestibilité cellulase	0,50	0,85	-4,05	0,56	0,92	-3,90
MAT	0,58	0,77	3,52	0,41	0,66	2,81
MM	0,26	0,85	-1,35	0,16	0,57	-0,11

TABLEAU 4 : Caractéristiques de la régression linéaire entre l'appareil SPIR MPA de Bruker à l'URP3F et deux appareils AgriNIR (Copavenir Poitiers et Touraine Conseil Elevage) sur 69 échantillons de foin de luzerne.

ADF : teneur en ligno-cellulose, MAT : matières azotées totales ; MM : matières minérales

Table 4: Characteristics of the linear regression between the Bruker MPA NIRS instrument at URP3F and two AgriNIR instruments (Copavenir Poitiers and Touraine Conseil Elevage) on 69 alfalfa hay samples.

Un troisième exemple concerne deux appareils très portables et peu onéreux qui ont été testés par ARVALIS Institut du végétal (SCIO de **Consumer Physics** et Tellspec de **Tellspec Inc.**) pour l'évaluation dans un premier temps de la teneur en matière sèche du maïs fourrage plante entière sur deux sites (La Jaillièrre et Saint-Hilaire en Woëvre). Environ 300 échantillons ont été analysés sur chacun des appareils et les valeurs de référence ont été obtenues par étuvage (72 heures à 80°C).

Quinze acquisitions spectrales (points de mesure) par échantillon ont été réalisées de façon à prendre en compte l'hétérogénéité des échantillons. Mais seul le spectre moyen a été exploité pour l'étude. Les différents prétraitements mathématiques appliqués aux spectres bruts ont permis d'homogénéiser les données provenant des deux sites d'essais, ainsi que celles des deux appareils utilisés dans cette étude.

Le Tellspec et le SCIO présentent des performances très similaires avec cependant une meilleure capacité du Tellspec à estimer des échantillons extérieurs à la base de données ayant servi à établir l'équation (Figure 6 et Tableau 5). Le Tellspec fournit ainsi un résultat à $\pm 5\%$. Les performances de ces instruments sont comparables à celles publiées dans la littérature (Fassio *et al.*, 2009; Soldado *et al.*, 2013) mais restent cependant trop faibles comparativement à l'expertise de l'éleveur capable d'estimer la matière sèche d'un lot à $\pm 3\%$.

Compte-tenu de l'incertitude de mesure de la matière sèche obtenue avec ces spectromètres miniatures, leur capacité à estimer d'autres

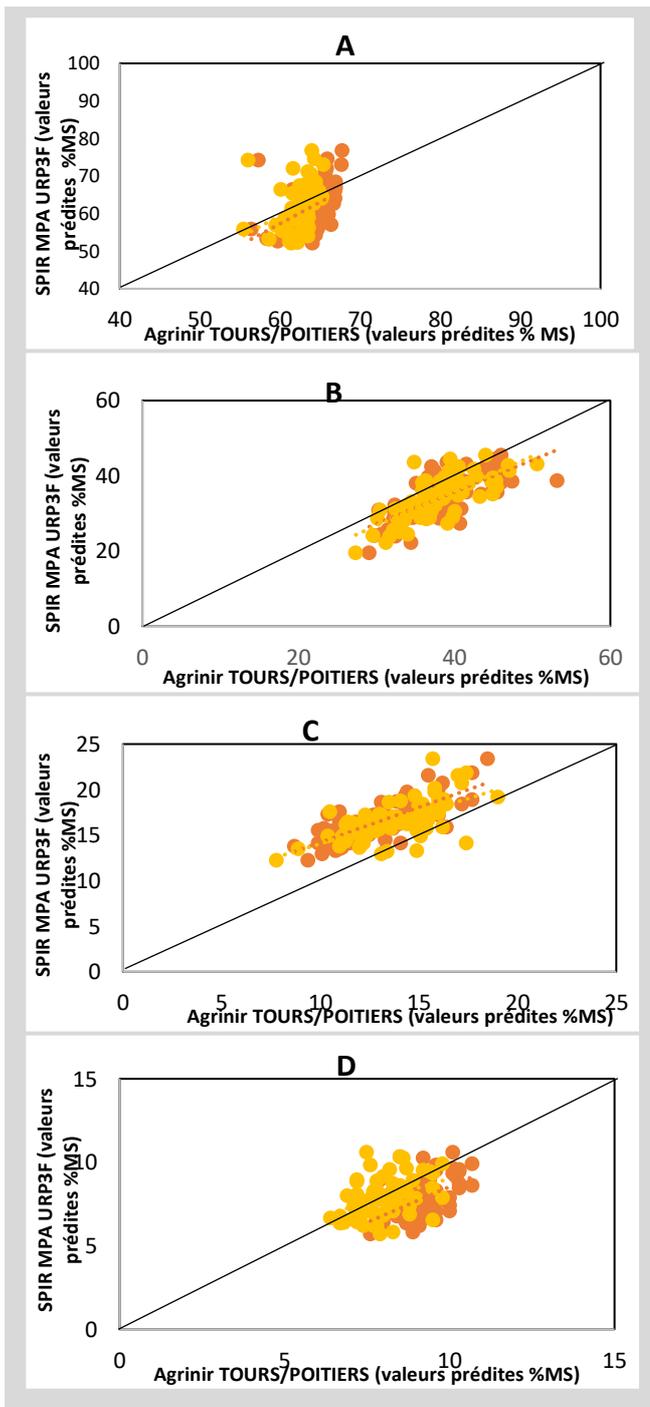


FIGURE 5 : Relation entre les valeurs prédites en SPIR avec (1) le MPA au laboratoire de l'URP3F et (2) les appareils AgriNIR de Touraine Conseil Elevage Tours (en jaune) et Copavenir de Poitiers (en orange) pour la digestibilité cellulase (A), la teneur en ligno-cellulose (B), la teneur en matière azotées totales (C) et la teneur en matières minérales (D) sur 66 échantillons de foin de luzerne.

Figure 5 : Relationship between the predicted SPIR values with (1) the MPA at the URP3F laboratory and (2) the AgriNIR instruments of Touraine Conseil Elevage Tours (yellow) and Copavenir of Poitiers (orange) for cellulase digestibility (A), lignocellulose content (B), total nitrogen content (C) and mineral content (D) on 66 samples of lucerne hay.

	Lot de calibration			Lot de validation			
	R ²	SEC	SECV	R ²	SEP	biais	penne
SCIO	0,70	2,11	2,37	0,58	2,77	0,46	0,78
Tel lspe c	0,75	2,10	2,36	0,73	2,40	0,53	0,99

TABLEAU 5 : Performances statistiques des équations développées avec l'appareil SCIO et l'appareil Telspec pour la détermination de la matière sèche (%) de maïs fourrage.

Table 5: Statistical performance of equations developed with the SCIO device and the Telspec device for the determination of dry matter (%) of forage corn.

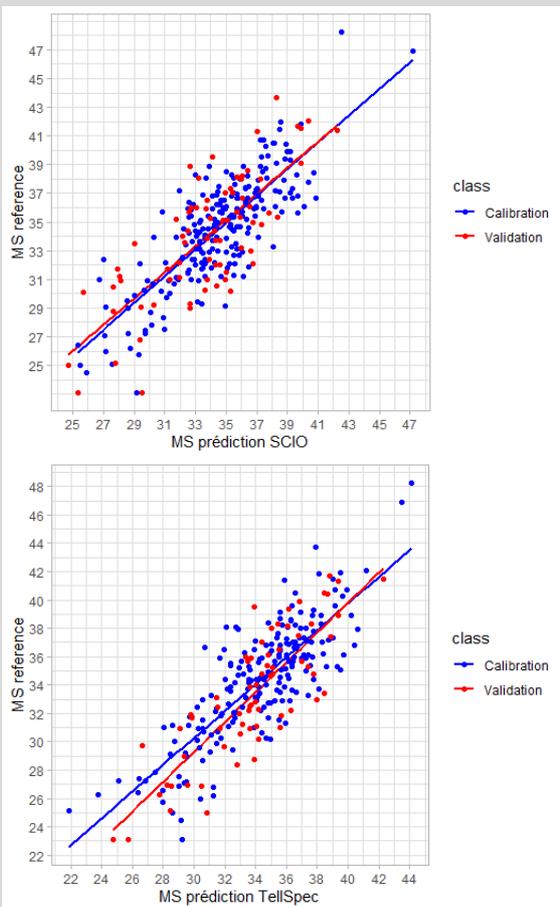


FIGURE 6 : Relation entre les valeurs de matière sèche de maïs fourrage estimées par SPIR (MS PREDICTION NIR) et obtenues par étuvage, 72 heures à 80°C (MS référence). A gauche avec l'appareil SCIO et à droite avec l'appareil Telspec. Ceci avec des données utilisées pour l'établissement de l'équation (calibration) et avec des données extérieures (validation).

Figure 6: Relationship between the dry matter values of forage corn estimated by NIRS (MS PREDICTION NIR) and obtained by steaming, 72 hours at 80°C (MS reference).

constituants biochimiques sur la matrice maïs fourrage n'a pas été évaluée. Cependant, la perspective des futurs spectromètres miniatures à bas coût mais performants reste envisageable avec l'arrivée constante de nouveaux produits sur le marché de la SPIR.

Conclusions et perspectives

La SPIR est un outil formidable pour estimer rapidement et à faible coût la digestibilité cellulase et la composition biochimique des fourrages et éventuellement leur teneur en matière sèche si une mesure est réalisée sur matériel non séché. Ces données peuvent être ensuite utilisées pour évaluer la valeur nutritive voire la valeur alimentaire à l'aide de modèles de régression adéquats. Cependant, l'obtention d'estimations SPIR correctes nécessitent que les échantillons à analyser soient biochimiquement proches d'échantillons ayant servi à la construction de l'équation.

Le contexte de changement climatique et de transition agro-écologique entraîne une diversification de plus en plus importante des fourrages à la fois entre les fourrages et au sein des fourrages. Cette diversité doit être prise en compte pour les prévisions SPIR. Ceci nécessite un échantillonnage approprié et des bases de données importantes. L'obtention de ces bases de données est lourde mais nous avons vu qu'il était possible de fusionner certaines bases comme celles obtenues sur fourrages vert et foin. La possibilité de partager de grandes bases de données avec des équations « locales » permettrait une économie importante et une grande robustesse face à des échantillons atypiques. Cependant, il reste des développements à faire pour des fourrages très diverses.

Il existe une gamme d'appareils SPIR portables de plus en plus importante. Les appareils se différencient principalement par leur gamme spectrale analysée, leur précision, leur portabilité et leur coût. Le choix de l'appareil dépend donc des objectifs fixés. A notre connaissance, il reste cependant des développements à réaliser pour l'obtention d'appareils SPIR très portables peu onéreux et suffisamment précis pour estimer les composants (digestibilité cellulase, MAT et MS) nécessaires à l'évaluation de la valeur alimentaire des fourrages directement par les éleveurs.

Remerciements : Les auteurs remercient vivement Eric Becourt de Bonsai advanced technologies pour le prêt d'un appareil LabSpec d'ASD ; Vincent Lictévout et Elisa Gentil de Conseil Elevage Touraine pour le prêt d'un appareil AgriNIR ; ainsi que Hervé Thomas de Copavenir à Poitiers pour le prêt d'un appareil AgriNIR. Nous tenons aussi à remercier le PSDR Flèche pour le financement des analyses de foin.

Article accepté pour publication le 16 juillet 2021

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agabriel J. *et al.*, (2018). "Alimentation des ruminants", *Éditions Quæ*, Versailles, France, 728 p.
- Andueza D., Picard F., Jestin M., Andrieu J., et Baumont R., (2011). "NIRS prediction of the feed value of temperate forages: efficacy of four calibration strategies." *Animal* **5**, 1002-1013.
- Andueza D., Picard F., Martin-Rosset W., et Aufrère J., (2016). "Near-infrared spectroscopy calibrations performed on oven-dried green forages for the prediction of chemical composition and nutritive value of preserved forage for ruminants." *Applied Spectroscopy* **70**, 1321-1327.
- Aufrère J., Baumont R., Delaby L., Peccatte J.-R., Andrieu J., Andrieu J. P., et Dulphy J. P., (2007). "Laboratory prediction of forage digestibility by the pepsin-cellulase method. The renewed equations." *Inra Productions animales* **20**, 129-136.
- Bastianelli D., Bonnal L., Barre P., Nabeneza S., Salgado P., et Andueza D., (2018). "Near-infrared spectrometry for the characterization of feed resources." *Inra Productions Animales* **31**, 237-254.
- Fassio A., Fernandez E.G., Restaino E.A., La Manna A., et Cozzolino D., (2009). "Predicting the nutritive value of high moisture grain corn by near infrared reflectance spectroscopy." *Computers and Electronics in Agriculture* **67**, 59-63.
- Ferard A., Decruyenaere V., Baumont R., and Maxin G., (2018). "Estimating the nutritional value of silage made from relay crops and mixtures of grains and protein crops." *Fourrages*, 47-54.
- Lesnoff M., Metz M., Roger J.M., (2020). "Comparison of locally weighted PLS strategies for regression and discrimination on agronomic NIR data." *Journal of Chemometrics* **34**, 1-13. <https://doi.org/10.1002/cem.3209>
- Liausson D., (2013). "Mise au point de l'analyse de plantes fourragères sur matériel frais dans le proche infrarouge." Rapport de stage M2. INRAE URP3F - CIRAD selmet pp. 29.
- Litrico I., Barkaoui K., Barradas A., Barre P., Beguier V., Birouste M., Bristiel P., Crespo D., Deleglise C., Durand J. L., Fernandez L., Gastal F., Ghesquiere M., Godinho B., Hernandez P., Julier B., Louarn G., Meisser M., Mosimann E., Picon-Cochard C., Roumet C., et Volaire F., (2016). "Using mixed-forage grasslands to deal with climate change: opportunities and challenges." *Fourrages*, 11-20.
- Osborne B. G., et Fearn T., (1998). "Near Infrared Spectroscopy in Food Analysis." *Harlow, UK: Longman Scientific and Technical*.
- Soldado A., Fearn T., Martinez-Fernandez A., et de la Roza-Delgado B., (2013). "The transfer of NIR calibrations for undried grass silage from the laboratory to on-site instruments: Comparison of two approaches." *Talanta* **105**, 8-14.