

Prédiction de la qualité fourragère des feuilles de *Sterculia setigera* Del. par la méthode de la Spectroscopie Proche Infra Rouge (SPIR)

Ma Anta MBOW^{1*}, Saliou NGOM³, Mayécour DIOUF², Léonard Elie AKPO¹

¹ Faculté des Sciences et Techniques, Biologie Végétale, Université Cheikh Anta Diop BP 5005 Fann-Dakar, Sénégal

² CNRF, BP 2312, Dakar, Sénégal

³ LENERV/ISRA

*Correspondance Email : maanta1810@yahoo.fr

Original submitted in on 22nd December 2012. Published online at www.m.elewa.org on 27th February 2013.

RESUME

Objectif: le but de cette étude est de prédire le qualité fourragère et nutritionnelle des feuilles de *Sterculia setigera* à différents stades phénologiques par l'utilisation de la Spectroscopie Proche Infra Rouge (SPIR).

Méthodologie et résultats : Les échantillons ont été obtenus à partir des récoltes effectuées sur des arbres choisis au hasard et analysés dans une SPIR monochromatique utilisant des longueurs d'ondes variant entre 900 et 1650 nm de la réflectance. Les coefficients de détermination de la calibration tels que l'erreur standard (SE), l'erreur standard de calibration (SEC), l'erreur standard dans la validation croisée (SECV) de même que coefficient de corrélation ($RSQ=R^2$) sont déterminés par le logiciel GRAMS-SUITE. La prédiction montre que certaines teneurs en protéines brutes, en fibres et en matières minérales ont été soit sous estimées ou surestimées. Cependant la faiblesse des écarts révèle que la méthode d'analyse chimique au laboratoire est fiable.

Conclusion et application: La SPIR est une méthode applicable à l'étude de la qualité du fourrage foliaire produit par *S. setigera*. Elle permet de différencier la qualité fourragère de chaque stade phénologique afin de choisir la meilleur période de récolte de ce fourrage. Ainsi les feuilles sénescentes peuvent être utilisées comme fourrage et permettre une meilleure conservation de l'espèce puisqu'il ne nécessite pas d'émondage ni d'élagage mais les jeunes présentent plus qualité.

Mots clés: valeur nutritive, SPIR, *S. setigera*, zone agropastorale, Sénégal.

ABSTRACT

Objectives: NIRS was used to predict the variation in the chemical composition of the leaves of *Sterculia setigera* during three periods: leaf bud, full leaf and leaf senescence in Senegal local agropastoral region.

Methodology and results: The samples were harvested from trees that were randomly selected and analyzed using a monochromatic NIR wavelengths ranging between 900 and 1650 nm reflectance. The calibration model was developed using data from chemical analysis by the technique of Van Soest (Goering & Van Soest, 1979), chemical absorption spectra given by NIRS using of partial least squares regression. The coefficients of determination of the calibration as the standard error (SE), standard error of calibration (SEC), the standard error in cross validation (SECV) as well as the correlation coefficient ($R^2 = RSQ$) are determined by GRAMS-SUITE software. The prediction showed that some crude protein, fiber

and minerals were either underestimated or overestimated. However, few differences in the chemical analysis in laboratory showed that this method was good.

Conclusion and application: NIRS is a method applicable to the study of forage quality of leaves from *S. setigera*. It can show the forage quality of each phenological stage to choose the best time to harvest the crop. Hence, senescent leaves can be used as fodder and enable better conservation of the species because it does not require trimming or pruning.

Keywords: nutrition, SPIR, *S. setigera*, agropastoral, Senegal.

INTRODUCTION

Les fourrages ligneux sont des matériaux complexes chimiques, physiques et biologiques enjambant une large gamme de composition chimique et de valeurs minérales nutritives. Cette variabilité de valeurs entraîne des différences entre espèces, étapes de maturation et de récolte, des conditions climatiques et de la technique de récolte (Park et al., 1999). Des techniques de laboratoires ont été développées et raffinées (ou améliorées) pour fournir des informations sur les nutriments et la qualité des aliments de bétail aux industriels, agriculteurs et chercheurs. Cependant, elles sont chères et prennent du temps (Alomar et Fuchslocher, 1998; Givens et Deaville, 1999; Deaville et Flinn, 2000). Depuis les années 1980, la SPIR a été considérée comme une méthode non destructive pour la détermination de la composition chimique dans tous les domaines de la science des aliments et de l'agriculture (Givens et Deaville, 1999). La SPIR joue un rôle important dans la réduction du coût, du temps requis pour tester une quantité d'échantillons, conjointement avec une augmentation du nombre d'échantillons qui pourraient être analysés (Coleman et al., 1985 et Petersen et al., 1987). Cette technique nécessite la manipulation cohérente des échantillons et une méthode d'étalonnage basée sur des analyses multivariées, qui convertissent le spectre d'absorption en informations de référence au laboratoire (Alomar et Fuchslocher, 1998;

Cozzolino et al., 2003; Roberts et al., 2004). La calibration est la clé de l'utilisation avec succès de la technique SPIR et il y a un nombre d'étapes essentielles requises pour développer le calibrage incluant la sélection de l'échantillon, l'obtention des spectres et des données de références, le prétraitement des données spectrales, la dérivation et la validation du modèle de régression. Cependant, le traitement de l'échantillon (séchage, broyage) et la présentation de l'échantillon à l'appareil constituent à la fois, des facteurs importants dans la robustesse et la précision de la SPIR en tant que technique d'analyse (Deaville et Flinn, 2000; Cozzolino et al., 2003; Roberts et al., 2004; Murray et Cowe, 2004). Bien que la SPIR soit intensivement utilisée pour mesurer les propriétés chimiques dans la large gamme des produits agricoles à travers le monde, c'est le Mali qui a pour la première fois utilisé cette technique dans la prédiction de la composition chimique des fourrages en Afrique de l'Ouest. Le Senegal vient de l'expérimenter avec le laboratoire national d'élevage et recherche vétérinaire de l'institut sénégalais de recherche agricole LNERV/ISRA. Ce retard est dû au manque de connaissance sur la technologie et au coût élevé de l'appareil et des logiciels. Le but de cette étude est l'utilisation de la SPIR pour prédire les qualités fourragère et nutritionnelle des feuilles de *S. setigera* à différents stades phénologiques.

MATERIEL ET METHODES:

Échantillonnage: Les prélèvements des feuilles de *Sterculia setigera* ont été effectués selon quatre facteurs. Le facteur département comprend trois (3) niveaux (Kaffrine, Kounguel et Tambacounda). Le facteur terroir villageois compte trois (3) niveaux avec

trois (3) répétitions soit neuf (9) terroirs villageois. Le facteur espèces comprend un niveau (*Sterculia setigera*) dont neuf (9) arbres par terroir villageois. Le facteur stade phénologique avec trois niveaux à savoir: débourrement foliaire (phéniphase1), pleine feuillaison

(phénophase2) et sénescence foliaire (phénophase3). L'échantillonnage a donc porté sur 81 arbres cependant le tiers a été utilisé pour la calibration. **NB :** Cette répartition en trois stades phénologiques au lieu de cinq (Gouzis and Sicot 1980) ou sept (Fournier 1990) a été guidée par l'objectif visé dans cette étude, qui est la répartition dans le temps du matériel végétal consommé par les animaux et inspirée par la méthode de (Diouf et al., 2003).

La spectroscopie proche infrarouge (SPIR) : La SPIR mesure des intensités d'absorption de radiations électromagnétiques dans les régions proche infrarouge (800 - 2500 nm) par les matières organiques. Le principe repose sur le fait que les liaisons chimiques O-H, N-H, C-H, etc. se comportent comme des oscillateurs vibrant en permanence à des fréquences spécifiques. Ces liaisons peuvent absorber une radiation proche infrarouge dont la fréquence est égale à sa fréquence de vibration et ainsi passer d'un état fondamental à un état excité. Les transitions énergétiques se font entre les niveaux d'énergie de rotation des molécules ou entre leurs niveaux d'énergie de vibration. De même, l'énergie des radiations dont les fréquences sont des multiples de la fréquence fondamentale peut être absorbée. On parle alors d'harmoniques. La SPIR est une technique fortement reproductible, capable de produire un « fingerprint » chimique précis des matières organiques (Ben-Dor et al., 1997).

Analyses chimiques : Les analyses chimiques ont été réalisées par la méthode de Van Soest, (1991) dans le laboratoire national d'élevage et de recherche vétérinaire de l'ISRA. Les échantillons collectés sont séchés à l'ombre d'abord puis mises dans une étuve à 105°C jusqu'à poids constant pour déterminer la teneur en matière sèche (MS) et broyés avec une broyeuse de fourrage. La teneur en cendres totales (MM) a été obtenue par calcination de la matière sèche à 550 °C. Les matières azotées totales (MAT) ont été établies selon la méthode de Kjeldahl ($N \times 6,25$) suite au dosage de l'azote totale. La cellulose brute (CB) est mesurée selon la méthode de Weende alors que les constituants pariétaux dont le NDF (*neutral detergent fiber*) et l'ADF (*acid detergent fiber*) sont dosés directement sur l'échantillon. L'ADL (*acid detergent lignin*) sulfurique est déterminé à partir de l'ADF.

Prédiction spectroscopique proche infrarouge: Les prédictions ont été effectuées à l'aide d'un spectromètre de réflexion NIRS System 6500. Les échantillons sont placés dans des capsules en quartz

et d'un fond amovible permettant de compresser l'échantillon contre le quartz. Ils sont ensuite éclairés par une source de radiations monochromatiques situées entre 800 et 2500 nm. Cependant les ondes utilisées pour la lecture varient entre 900nm et 1650nm. L'énergie réfléchie par l'échantillon est mesurée. Un spectre est enregistré pour chaque échantillon, représentant l'absorbance (A) en fonction de la longueur d'onde, avec une mesure toutes les 2 nm. La mesure de la quantité de radiations réfléchies permet de déduire la quantité de radiations infrarouges absorbée par l'échantillon. En effet, la réflectance (R) est convertie en absorbance (A) par la relation suivante: $A = \log(1/R)$.

Méthode des moindres carrés partiels (PLS): La méthode des moindres carrés partiels (Partiel Least Square: PLS) est utilisée pour ajuster un modèle statistique reliant des variables explicatives X à des variables à expliquer Y. Cette procédure est principalement utile lorsqu'il y a de nombreuses variables prédictives et que le but premier est de prévoir les variables de réponse. A la différence des autres procédures de régression, des estimations peuvent être calculées même si le nombre de variables prédictives est plus grand que le nombre d'observations. La régression PLS est largement utilisée dans le cadre de chimométrie en étalonnage spectrométrique et notamment pour la spectroscopie proche infrarouge. Le but principal de la PLS est de construire un modèle linéaire, $Y=XB+E$, où Y est une matrice de n observations par m variables de réponse, X est une matrice de n observations par p variables prédictives, B est une matrice de coefficients de régression p par m et E est le terme d'erreur du modèle de même dimension que Y. En effet, la PLS est une extension de la régression linéaire multiple. Sous sa forme la plus simple, un modèle linéaire exprime la relation linéaire entre une variable dépendante (réponse) Y, et un ensemble de variables prédictives X, telle que: $Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p$. Dans cette équation, b_0 est l'ordonnée à l'origine ou la constante, et les valeurs b_i sont les coefficients de régressions (pour les variables 1 à p) calculés à partir des données. Une étape très importante dans l'ajustement du modèle dans un but prédictif est de vérifier les résultats (validation croisée), c'est-à-dire d'appliquer le modèle considéré sur un ensemble de données n'ayant pas servi à établir ce modèle (*i.e.* à estimer les paramètres). Cette méthode permet de tester la robustesse des modèles de prédiction. Pour estimer les performances

de prédiction d'un modèle, les termes statistiques les plus intéressants sont le coefficient de régression linéaire R^2 entre les valeurs prédites calculées par le modèle et les valeurs réelles, l'erreur standard (standard déviation: SD), l'erreur standard de calibration (standard error of calibration: SEC) et le pourcentage de variance expliqué par l'équation. Le logiciel GRAMS-Suite a été construit le modèle PLS.

Analyses multivariées: Les données ont été saisies sur le tableur Excel et traitées par le logiciel XLSTAT. Les analyses de données ont porté sur l'analyse de variance (ANOVA) et des analyses multivariées dont l'Analyse en composante principale (ACP) pour isoler les différents types selon les stades phénologiques.

RESULTATS.

Calibration des constituants chimiques, minéraux et organiques : Tableau 1: Rapport de la calibration

des différents constituants Chimiques, minéraux et organiques des feuilles de *S. setigera* de la SPIR:

Constituants	R ²	SEC	Outliers
MAT	0,63	1,54	1
CB	0,11	2,34	0
NDF	0,65	2,1	5
ADF	0,61	3,13	5
ADL	0,41	10,23	0
Na	0,54	1,18	0
Ca	0,6	0,54	0
P	0,49	0,067	0
C	0,79	7,66	0

R²: coefficient de corrélation; SEC: Erreur standard de calibration; Outliers: nombre d'absorbance supprimée pour améliorer le coefficient de corrélation; MAT : matière azotée totale ; NDF : neutral détergent fiber ; ADF : acid detergent lignin ; ADL : acid detergent fiber ; CB : Cellulose brute ; Na : sodium ; P : phosphore ; C : carbone ; Ca : calcium.

La valeur de R^2 varie entre 0,11 pour la cellulose brute et 0,79 pour le carbone (tableau1). Cette valeur est de 0,63 (MAT), 0,65 (NDF), 0,61 (ADF), 0,41 (ADL) alors pour les éléments minéraux elle est de 0,54 (Na), 0,6 (Ca) et 0,49 (P). L'erreur standard de validation croisée est très faible pour le Phosphore (0,067) et le Calcium (0,54) et élevée pour le carbone (7,66) et la lignine (10,23). La droite de régression est un paramètre utilisé pour apprécier la robustesse de la prédiction dans la méthode SPIR (Williams, 2001). La droite de régression des valeurs de matières azotées mesurées par les analyses chimiques directes et valeurs prédites (Figure1) par la SPIR montre une bonne corrélation.

L'analyse de variance révèle que tous les paramètres chimiques mesurés et prédits permettent de discriminer de la même façon les différents stades phénologiques sauf l'ADF dont les valeurs mesurées regroupent les stades phénologiques 2 et 3 (groupe a) et isole stade 1 (groupe b) alors que celles prédites indiquent deux groupes (b et a) respectivement phénophase (1 et 3) et un troisième groupe intermédiaire (ab) phénophase 2 (tableau2).

Pour tous les constituants, les écarts entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites ne dépassent pas 3g/%MS exceptée la lignine de la phénophase 2 où l'écart est de 4,07 g/%MS.

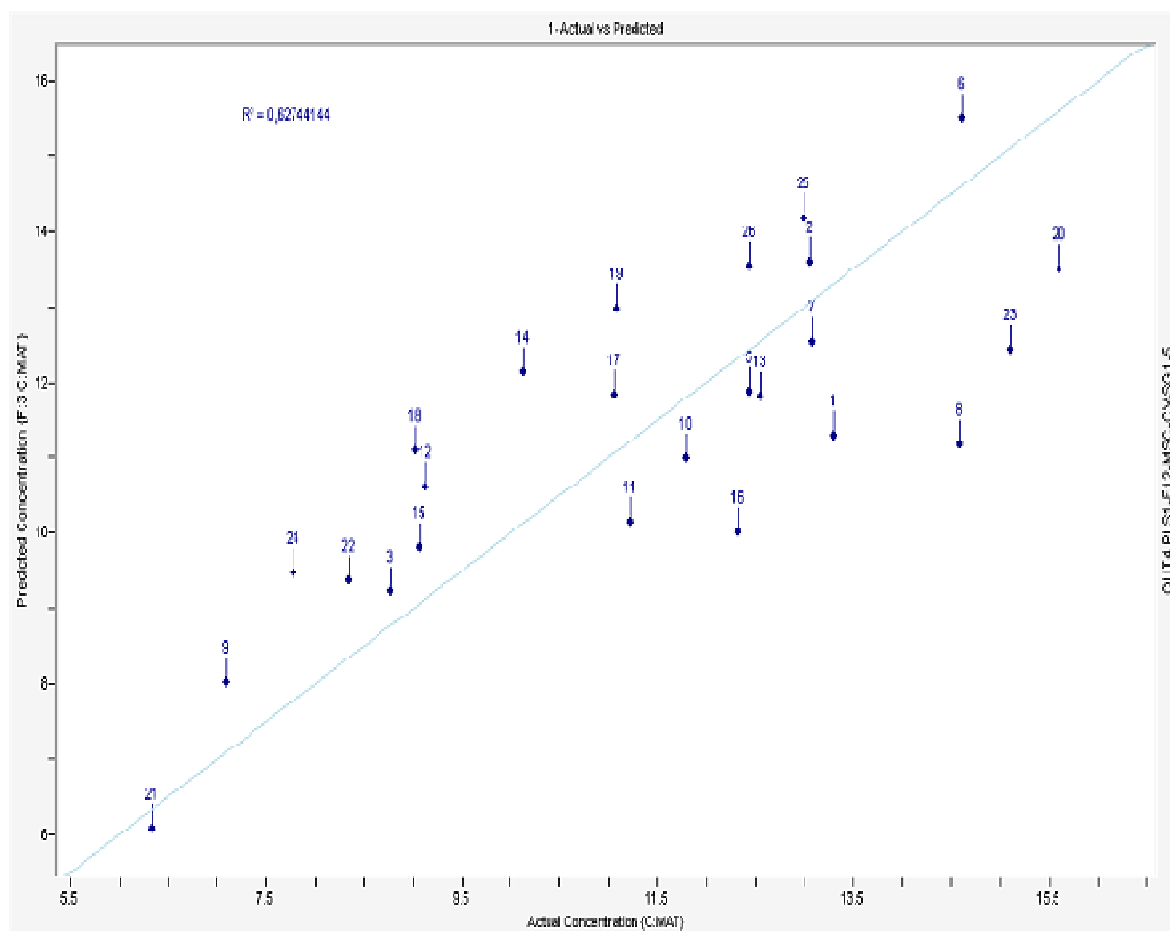


Figure1: Droite de régression multiple des valeurs de matières azotées mesurées et prédites

Variation de la qualité du fourrage des feuilles selon les stades phénologiques: Comparaison des résultats de l'analyse chimique et de la SPIR :

Tableau 2. Teneurs moyennes mesurées et prédites (en g/% MS) en matières azotées, cellulose brute et des constituants pariétaux des feuilles de *Sterculia setigera*:

Composition chimique	MAT		CB		NDF		ADF		ADL	
	mesurée	prédite	mesurée	prédite	mesurée	prédite	mesurée	prédite	mesurée	prédite
Phénopase 1	12,29 b	12,27 b	25,90 ab	26,22 ab	47,75 b	47,59 b	40,13 b	40,74 b	16,11 a	13,05 a
Phénopase 2	13,23 b	12,29 b	23,95 a	24,80 a	46,52 ab	46,06 ab	37,17 a	37,06 ab	15,94 a	11,87 a
Phénopase 3	8,01 a	9,03 a	28,14 b	26,94 b	43,05 a	44,01 a	35,50 a	34,20 a	14,43 a	11,78 a

MAT : matière azotée totale ; CB : Cellulose brute ; NDF : neutral detergent fiber ; ADF : acid detergent lignin ; ADL : acid detergent fiber.

Tableau 3. Teneurs moyennes mesurées et prédites (en g/% MS) en matières minérales des feuilles de *Sterculia setigera*:

Composition minérale	Na		Ca		P		Ca/P	
	mesurée	prédite	mesurée	prédite	mesurée	prédite	mesurée	prédite
Phénophase 1	3,62 a	1,87 a	1,06 a	0,72 a	0,17 a	0,06 a	6,23 a	12,01 a
Phénophase 2	3,51 a	1,96 a	1,64 b	0,82 a	0,12 a	0,075 ab	13,66 b	10,93 b
Phénophase 3	3,42a	1,60 a	1,29 ab	1,11 a	0,11 a	0,13 b	11,72 c	8,54 c

Na : sodium ; Ca : calcium ; P : phosphore ; Ca/P : calcium sur phosphore.

Les valeurs mesurées et prédites de sodium (Na) ne permettent pas de différencier les trois stades phénologiques. Il en est de même les valeurs prédites de calcium (Ca) et mesurées de phosphore (P). Par contre la méthode chimique (dosage directe) discrimine pour le calcium la phénophase 1 (groupe a) de la phénophase 2 (groupe b) alors que la phénophase 3 est intermédiaire (groupe ab). La SPIR quant à elle, sépare le groupe a (phénophase 1), le groupe b (phénophase 3) et le groupe ab (phénophase 2) (tableau 3). Si le rapport Ca/P mesuré est inférieur pour le stade 1 il est plus élevé pour le stade 3. Cependant ce rapport indique trois groupes (a, b et c) respectivement stade (1, 2 et 3).

Analyse en composante principale des constituants mesurés et prédits : L'ACP indique selon l'axe horizontal deux types de fourrage à savoir le fourrage de la troisième phénophase (type1) qui s'oppose au fourrage formé par la première et la deuxième phénophase (type 2). Le type 1 est caractérisé par un taux de cellulose brute (CB) élevé par les deux méthodes d'analyse et le type 2 est caractérisé la matière azotée totale (MAT), et les fibres (ADL, ADF, et le NDF). Par contre l'axe vertical permet de distinguer le fourrage de la première phénophase caractérisé par le NDF, l'ADF et la lignine et le fourrage de la deuxième phénophase caractérisé par la matière azotée élevée.

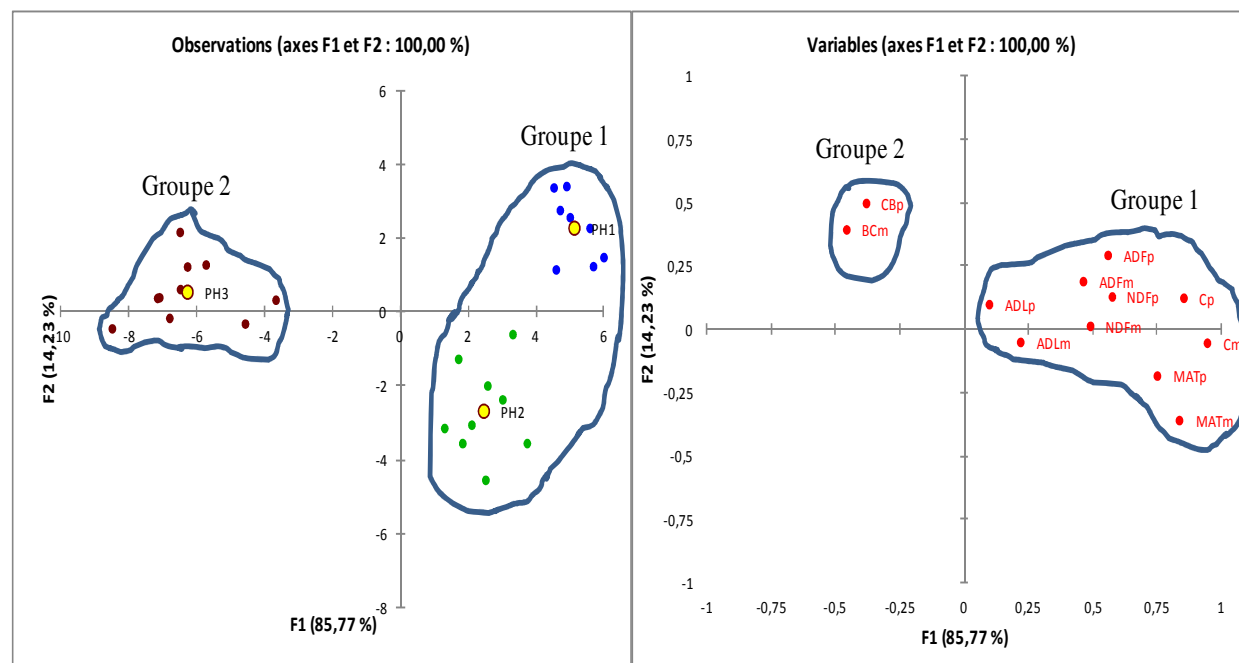


Figure 2: ACP des constituants chimiques et organiques mesurés et prédits X les trois stades phénologiques:

DISCUSSION

La précision du modèle de calibration est estimée à partir de plusieurs critères. La valeur du coefficient de détermination R^2 est souvent employée comme premier critère (Couteaux *et al.*, 2003). R^2 , compris entre 0 et 1, représente la part de la variabilité expliquée par le modèle. L'équation de calibration décrit au mieux la variabilité des données spectrales quand R^2 tend vers 1. Une valeur de R^2 supérieure à 0,8 qualifie une calibration satisfaisante alors que pour des valeurs de R^2 comprise entre 0,5 et 0,7 le modèle est approximatif (Williams, 2001). Ainsi, la valeur de R^2 (0,79) pour le carbone permet une bonne calibration, alors que pour la MAT, l'ADF, le NDF, le Ca et le Na, le R^2 qui varie entre 0,54 et 0,65 donne une calibration approximative. Par contre pour la CB et l'ADL la calibration n'est pas bonne. Pendant l'analyse, les « outliers » ou individus présentant des valeurs aberrantes, sont ceux ayant une distance normalisée de Mahalanobis supérieure à 3. Cinq échantillons ont ainsi été exclus de la banque de données pour l'ADF et le NDF. Cependant le R^2 n'est le seul paramètre de validation d'une calibration. Les écarts (SEC= erreur standard de calibration) entre les valeurs mesurées et prédites constituent un moyen de vérification de la robustesse du modèle. Cette valeur pour la calibration est basse et en déplace pas 3g/%MS pour tous les paramètres sauf la lignine (4g/%MS). Ces valeurs sont inférieures à celles obtenues par INRA 2007. Toutes les espèces fourragères très appréciées citées par Le Houerou, (1980a et 1980b) en milieu soudanien présentent une variation au niveau de la qualité fourragère selon les phénophases. Cette variation a été aussi notée par Traoré, (1983) et Fall, (1993) avec *Faidherbia albida*, *Calotropis procera* et *Balanites aegyptiaca*. Pour *Sterculia setigera* la qualité du fourrage diffère selon les phénophases. L'ACP révèle deux groupes suivant l'axe horizontal: le groupe 1 formé par les phénophases 1 et 2, et le groupe 2 constitué par la phénophase 3 et l'axe vertical sépare la phénophase 1 de la phénophase 2. Le groupe 1 est caractérisé par un taux de MAT et de constituants pariétaux (NDF, ADF et ADL) élevés alors que le groupe 2 possède un taux de cellulose brute très important. Si la valeur de lignine mesurée est plus élevée dans la phénophase 2 (13,66 %MS) celle

prédite l'est dans la phénophase 1 (12,01% MS). Les teneurs en constituants pariétaux (NDF, ADF) sont très faibles comparativement à celle des fourrages pauvres (pailles de brousse de saison sèche, 75% MS) (Rivière, 1991). Les taux de lignine mesurés et prédits dans tous les stades phénologiques sont inférieurs à ceux *Zizyphus mauritiana* 70,7% MS (Kaboré-Zoungana, 1995), *Leucaena leucocephala* 17,54% MS (Tedonkeng Pamo *et al* 2004). Le taux de lignine est plus faible dans la troisième phénophase. Cette diminution de la lignine dans les feuilles sénescentes peut être liée à la variation de la température (Gindl *et al.*, 2000). En effet la première phénophase coïncide avec la période chaude et sèche (Mai-Juin). Avec la chaleur, certaines plantes augmentent leur taux de lignine pour diminuer les pertes d'eau. La pleine feuillaison coïncide avec la période pluvieuse mais chaude par contre la période de sénescence foliaire est froide et sèche et la plante adopte la stratégie de la chute des feuilles. Cette période est celle de la production abondante de gomme par l'espèce (Lô, 1996 et Touré, 2009). *Faidherbia albida*, une espèce fourragère commune du milieu soudanien à phénologie inversée présente une variation de la qualité fourragère selon les phénophases (Le Houerou, 1980a). Dans tous les stades phénologiques le taux de MAT est supérieur à la norme de 70 g/kg MS établie par Milford et Minson, (1965), aussi bien dans les valeurs mesurées que prédites par SPIR. Elle est de 122,9 g/kg MS ; 132,3g/kg MS et 80,1 g/kg MS pour les stades phénologiques 1, 2 et 3 respectivement pour les valeurs mesurées et de 122,7g/kg MS ; 122,9 g/kg MS et 90,3 g/kg MS pour les valeurs prédites par la SPIR. Ainsi les feuilles sénescentes même si elles possèdent des taux de protéines brutes faibles comparé aux stades 1 et 2, peuvent être considérer comme un bon fourrage avec la lignine faible, la cellulose élevée et le rapport Ca/P de 8,54. En effet ce rapport est supérieur à la norme de 2, mais il est meilleur comparé aux valeurs trouvées dans les stades 1 et 2 (12,01 et 10,93) respectivement. Un rapport Ca/P supérieur à 2 entraîne un déficit d'absorption des deux minéraux (Abdulrazak *et al.*, 2000).

CONCLUSION

La SPIR est une bonne méthode applicable à l'étude de la qualité du fourrage foliaire produit par *S. setigera*. Elle permet en outre de différencier la qualité fourragère de chaque stade phénologique afin de

choisir la meilleure période de récolte de ce fourrage. Ainsi l'utilisation de ces feuilles sénescentes comme fourrage pourrait permettre une meilleure conservation de l'espèce puisqu'il ne nécessite pas d'émondage ni

d'élagage. Il faut noter que les jeunes feuilles présentent une meilleure qualité fourragère mais

nécessite une agression de la plante par l'émondage.

RÉFÉRENCES

- Abdulrazak, S. A., Fujihara T., Ondiek J.K. and Orskov E.R. 2000. Nutritive evaluation of some Acacia tree leaves from Kenya. *Animal Feed Science and Technology* 85: 89-98.
- Alomar, D., Y. R. Fuchslocher. 1998. Fundamentos de la espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) como método de análisis de forrajes. *Agro Sur* 26:88-104.
- Ben-Dor, E., Inbar Y. & Chen Y. 1997. The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short wave infrared region (400-2500 nm) during a controlled decomposition process. *Remote Sensing of Environment* 61, 1-15.
- Coleman, S.W., Barton F.E., Meyer R.D. 1985. The use of near-infrared reflectance spectroscopy to predict species composition of forage mixtures. *Crop Science*, 25, 834-837.
- Couteaux, M.M., Berg, B. & Rovira, P. 2003. Near infrared reflectance spectroscopy for determination of organic matter fractions including microbial biomass in coniferous forest soils. *Soil Biology and Biochemistry* 35, 1587-1600.
- Cozzolino, D. & Moron, A. 2003. The potential of near-infrared reflectance spectroscopy to analyse soil chemical and physical characteristics. *Journal of Agricultural Science* 140, 65-71.
- Deaville, E.R., and P.C. Flinn. 2000. Near infrared (NIR) spectroscopy: an alternative approach for the estimation of forage quality and voluntary intake. 301-320 p. *In* Givens, D.I., E. Owen; R.F.E. Axford, and H.M. Omedi (eds.) Forage evaluation in ruminant nutrition. CABI Publishing, Wallingford, UK.
- Diouf M., 2003. caractéristiques fondamentales de la feuillaison d'une espèce ligneuse sahélienne *Acacia tortilis (forsk.) hayne*. Variations selon les microsites topographiques au Ferlo nord-sénégal). D3C, 103p.
- Fall S.T., 1993. Valeur nutritive des fourrages ligneux. Leur rôle dans la complémentation des fourrages pauvres des milieux tropicaux, Thèse Doctorat. Université des Sciences et Techniques de Languedoc, ENSAM Montpellier, France, 143 p.
- Fournier A. 1990. Phénologie, croissance et production végétales dans quelques savanes d'Afrique de l'Ouest. Thèse de fourrages ligneux. Séminaire régional sur les fourrages et l'alimentation des ruminants IRZ/IEMVT. N'Gaoundéré (Cameroun).
- Gindl, W., M. Grabner and R. Wimmer, 2000. The influence of temperature on latewood lignin content in treeline Norway spruce compared with maximum density ring width. *Trees-structure and Function*, 14p, 409-414
- Givens, D.I., and E.R. Deaville. 1999. The current and future role of near infrared reflectance spectroscopy in animal nutrition: a review. *Aust. J. Agric. Res.* 50:1131-1145.
- Grouzis M. et Sicot M. 1980. Une méthode d'étude phénologique de population d'espèces ligneuses sahélienne : Influence de quelques facteurs écologiques. *In* (H.N.) Le Houérou , Colloque international sur les fourrages ligneux en Afrique, état des connaissances. Addis-Abeba, Ethiopie, 8-12 avril, CIPEA, pp. 231-237 ISRA 1978 Alimentation des ruminants. INRA Edition, Versailles, 597 p
- Kaboré-Zougrana., 1995. Composition chimique et valeur nutritive des herbacées et ligneux des pâturages naturels soudanais et des sous-produits du Burkina Faso, doctorat ès Sciences Naturelles. Université de Ouagadougou, Faculté des Sciences et Techniques, Sciences Naturelles 22 (2) 2 p.
- Le Houérou H. N., 1980a. Composition chimique et valeur nutritive des fourrages ligneux en Afrique tropicale occidentale. *In* (H N Le Houérou (Editeur), Colloque international sur les fourrages ligneux en Afrique, état des connaissances. Addis-Abeba, Ethiopie, 8-12 avril, CIPEA, pp. 259-284.
- Le Houérou H. N., 1980b. The rangelands of the sael. *Journal of range management* 33(1) : 5p.
- Lô Modou., 1996. Contribution à l'étude botanique et physico-chimique des gommés de *Sterculia* L. (*Sterculiaceae*): valorisation de la production de *Sterculia setigera* Del. et incidences socio-économiques au Sénégal. Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop, Faculté de

- médecine et de pharmacie, Dakar, Sénégal, (1996) 320.
- Milford R. and Minson D. J., 1965. Intake of tropical pasture species. In Proceedings of the 9th International Grassland Congress, Sao Paulo, Brazil, pp. 815-822.
- Murray, I., and I. Cowe. 2004. Sample preparation. p. 75- 115. In Roberts, C.A., J. Workman, and J.B. Reeves III (eds.) Near infrared spectroscopy in agriculture. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
- Park, P.S., R.E. Agnew, F.J. Gordon, and R.J. Barnes. 1999. The development and transfer of undried grass silage calibrations between near infrared reflectance spectroscopy instruments. Anim. Feed Sci. Technol. 78:325-344.
- Petersen, J.C., Barton F.E., Windham W.R., Hoveland C.S. 1987. Botanical composition of tall fescue white clover mixtures by near infrared reflectance spectrometry. Crop Science, 27, 1077-1080.
- Rivière R. 1991. Manuel d'alimentation des ruminants domestiques en milieu tropical. Paris, France Ministère de la Coopération et du Développement. 529 p.
- Roberts, C.A., J. Stuth, and P.C. Flinn. 2004. Analysis of forages and feedstuffs. p. 231-269. In Roberts, C.A., J. Workman, and J.B. Reeves (eds.) Near infrared spectroscopy in agriculture. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
- Tedonkeng Pamo E., Tendonkeng F., Kana J.R., Loyem P.K., Tchapgá E. et Fotie F.K. 2004. Effet de différents niveaux de supplémentation avec *Leucaena leucocephala* sur la croissance pondérale de la chèvre Naine de Guinée. Revue Elev. Med. Vet. Pays trop. 57(1-2) : 107-112.
- Traoré E. H., 1983. Evaluation des potentialités et perspectives de développement de la gomme mbepp (*Sterculia setigera*). Mémoire de stage. Ecole Nationale des cadres ruraux Bambey 37p.
- Van Soest J. P., Robertson J. B. and Lewis B. A. 199. Methods for dietary fibre, neutral detergent fibre and non-starch polysaccharides in relation to animal production. Journal of Dairy Science 74: 3583-3597 <http://jds.fass.org/cgi/reprint/74/10/3583.pdf>
- Williams, P.C. 2001. Implementation of near-infrared technology. p. 145-169. In Williams, P.C., and K.H. Norris (eds.) American Association of Cereal Chemist, St. Paul, Minnesota, USA.