

# Prédiction de la composition chimique de variétés de sorgho vert par spectrométrie proche infrarouge

F. Chataigner, J.-C. Emile, M. Al Rifai, P. Barre

Dans toutes les situations où la ressource en eau risque d'être de plus en plus limitée, le sorgho pourrait remplacer le maïs. Mais la valeur alimentaire de son ensilage est mal connue, d'autant plus qu'il existe une grande diversité de matériel génétique et de modes de conduite. D'où l'intérêt de développer une équation par spectrométrie proche infrarouge pour prédire sa valeur alimentaire.

## RÉSUMÉ

Une calibration infrarouge sur 268 échantillons de sorgho vert couvrant une grande gamme de variation a permis de définir une équation de prédiction. La validation sur un autre ensemble d'échantillons montre que la qualité de prédiction est très satisfaisante pour les critères NDF et digestibilité, et satisfaisante pour ADF et MAT. Pour tous ces critères, l'équation "sorgho" donne des résultats plus proches des analyses chimiques qu'en utilisant l'équation "maïs". Cette équation "sorgho" va être améliorée prochainement.

## SUMMARY

### **Predicting the chemical composition of green sorghum using near infra-red spectrometry**

In situations where there is a risk water resources could become scarcer, sorghum could be grown instead of maize. The problem is that the nutritional value of sorghum silage is not well known, particularly as there is a wide diversity in genetic material and cultivation practices, hence the interest of determining an equation using near infra-red spectrometry to predict the nutritional value of sorghum. An infra-red calibration based on 268 samples of green sorghum allowing for a wide range of variations made it possible to determine a prediction equation. Validation carried out on further samples show a very satisfying quality of prediction for NDF and digestibility, and a satisfying quality of prediction for ADF and CP. For all these criteria, the 'sorghum' equation yields results that are closer to chemical analyses than the 'maize' equation. The 'sorghum' equation will be improved in the near future.

Dans un contexte où l'eau est une ressource de plus en plus disputée, le sorgho grain (*Sorghum bicolor* M.) présente des atouts agronomiques et zootechniques pour l'alimentation des ruminants sous forme d'ensilage en plante entière. Cependant, la **valeur alimentaire** des fourrages de cette espèce est **mal connue** pour deux raisons : tout d'abord, peu de mesures ont été réalisées sur ces fourrages dans les années 70 à 90 au regard de la **très grande variabilité morphologique de cette espèce** et, par ailleurs, **les équations obtenues sur d'autres espèces comme le maïs ne sont pas totalement satisfaisantes**. Etant donné que des mesures directes de valeur alimentaire sur animaux sont coûteuses et complexes à mettre en œuvre, il est nécessaire de mettre au

point une méthode rapide et évolutive permettant d'analyser un grand nombre d'échantillons. Une première estimation peut être obtenue à l'aide d'analyses biochimiques qui restent toutefois lourdes et coûteuses.

Afin de remédier à ces problèmes, la spectroscopie infrarouge est couramment utilisée pour prédire la qualité nutritionnelle des fourrages et du maïs ensilage (SHENK *et al.*, 1979). Le but de notre étude est de **développer une équation par spectrométrie proche infrarouge (SPIR)** permettant de prédire la composition biochimique d'une large gamme de diversité de sorghos grain destinés à l'ensilage. Cette équation est réalisée **pour le sorgho vert au moment de la récolte**, sans attendre l'ensilage. Il est

## AUTEURS

INRA, UR 4, Unité de Recherche Pluridisciplinaire Prairies et Plantes Fourragères, Le Chêne, RD 150, BP 80006, F-86600 Lusignan ; fabienne.chataigner@lusignan.inra.fr

**MOTS CLÉS** : Composition chimique, digestibilité, fourrage, méthode d'estimation, sorgho, sorgho fourrager, spectrométrie proche infrarouge, valeur alimentaire, valeur azotée.

**KEY-WORDS** : Chemical composition, digestibility, estimation method, feeding value, forage, forage sorghum, grain sorghum, nitrogen value, spectrophotometry.

**RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE** : Chataigner F., Emile J.C., Al Rifai M., Barre P. (2011) : "Prédiction de la composition chimique de variétés de sorgho vert par spectrométrie proche infrarouge", *Fourrages*, 206, 129-132.

supposé une bonne corrélation entre la valeur alimentaire pré- et post-ensilage comme cela est le cas chez le maïs. L'établissement d'une équation de prédiction demande l'introduction dans la base initiale de données spectrales et chimiques pour des échantillons représentant la gamme de variabilité (récoltes, conduites culturales et variétés différentes) dans laquelle l'équation sera utilisée. Il est ensuite nécessaire de procéder à une étape de validation en utilisant un set externe d'échantillons, différent du set de calibration (DARDENNE, 2010). Dans notre étude, la validation a été réalisée sur des sorghos grains issus d'une année de récolte différente. Nous avons ensuite comparé cette validation à celle qui aurait été obtenue en appliquant une équation "maïs plante entière" comme cela est couramment réalisé.

## 1. Matériel et méthodes

### ■ Origine des échantillons

Les échantillons (au nombre de 268) utilisés pour la **calibration infrarouge** proviennent de cultures ou d'essais conduits pour l'ensilage à Lusignan (Vienne, dans le Poitou-Charentes) entre les années 2003 et 2007 et représentent **une large gamme de variation** tant au niveau du type de conduite que du matériel génétique évalué. Outre l'effet "année culturale", les facteurs de variation sont les dates de semis et de récolte, la présence ou l'absence d'irrigation, la densité de semis (de 200 000 à 650 000 grains/ha), l'écartement (de 0,75 à 0,20 m entre rangs), la précocité (très précoce à très tardif), la teneur en grain (de 0 à 55% de la matière sèche, MS), le gabarit (de 0,8 à 3,3 m de hauteur) et le potentiel de rendement (de 6 à 22 t MS/ha) avec trois grands types de variétés (type nain, type sucrier et type biomasse). Les échantillons utilisés pour la **validation** proviennent d'un essai variétal (49 variétés de types grain et sucrier) conduit en 2008 à Lusignan et dans le Maine-et-Loire.

Les 317 échantillons (268 pour la calibration et 49 pour la validation, représentant plus de 25 variétés identifiées) ont été prélevés au champ juste avant la récolte, en fourrage vert, puis hachés, séchés à 60°C pendant 72 heures et enfin broyés à la grille de 1 mm. Des échantillons de ce broyat ont été prélevés afin de mener d'une part le passage à l'infra-analyseur et, d'autre part, les analyses biochimiques.

### ■ Analyses chimiques

Les analyses chimiques suivantes ont été réalisées sur les échantillons de calibration : matière minérale (notée Cdr ; passage au four à 550°C pendant 3 heures), teneur en parois végétales (NDF ; VAN SOEST et WINE, 1967), matière azotée totale (Mat ; AOAC, 1996), digestibilité (DCs ; AUFRÈRE et MICHALET-DOREAU, 1983) et teneur en amidon (Dir 1999/79/CE). Les résultats sont exprimés en pourcentage de la matière sèche.

### ■ Calibrations et statistiques

Après séchage à 40°C durant 12 heures, les spectres ont été collectés à l'aide d'un spectrophotomètre monochromatique (NIRS 6500 ; Foss NIRSystems, Silver Spring, MD, USA). La mesure a été réalisée en réflectance dans des coupelles circulaires de 50 mm de diamètre recouvertes d'un verre en quartz. Les données spectrales ont été mesurées tous les 2 nm de 1 108 à 2 492 nm. Les prétraitements des spectres appliqués ont été les suivants : SNV and Detrend ; 1,4,4,1. La calibration a été développée en utilisant la méthode de régression partielle des moindres carrés (PLS) sous le Logiciel WINISI II. Les échantillons sont éliminés de la calibration (*outliers*) lorsque la différence entre la méthode de référence et la valeur prédite est 2,5 fois plus élevée que le SECV ( $T=2,5$ ). Deux passes d'élimination ont été réalisées. **La qualité de la calibration** obtenue **a été évaluée** en fonction du coefficient de détermination de la validation externe ( $R^2$ ), de l'erreur standard de prédiction (RMSEP), du biais (moyenne des différences entre les valeurs prédites et celles de chimie analytique) et du rapport (RPD) entre l'écart type des données de référence (SD) et l'écart type entre valeurs prédites et analytiques (SECV ou RMSEP). Une valeur de RPD comprise entre 2,5 et 3 a été considérée comme adéquate pour des applications analytiques (SINNAEVE *et al.*, 1994).

## 2. Résultats et discussion

Le tableau 1 présente les données de composition biochimique de la base de calibration ainsi que **les paramètres de l'équation obtenue**. Pour chaque paramètre chimique, la variabilité et la répartition des données obtenues sont satisfaisantes, ce qui est essentiel à la réalisation d'une calibration correcte. Le nombre d'*outliers* représente moins de 5% des échantillons pour

Paramètre	Statistiques de la base de calibration*					Caractéristiques* de l'équation "sorgho vert"				
	Moyenne	SD	Min.	Max.	N	Outliers	SEC	SECV	R <sup>2</sup>	RPDcv
<b>NDF</b>	51,58	8,40	27,99	73,25	254	12	1,58	1,74	0,96	4,82
<b>ADF</b>	26,32	4,85	12,74	40,84	232	9	0,97	1,09	0,96	4,46
<b>DCs</b>	63,88	7,40	44,62	81,62	258	4	1,68	1,90	0,95	3,89
<b>Mat</b>	7,85	1,88	4,06	12,56	230	5	0,27	0,30	0,98	6,17
<b>Cdr</b>	5,20	1,05	3,28	9,85	233	5	0,22	0,26	0,96	4,12
<b>Amidon</b>	17,91	10,60	0,54	47,49	103	5	1,45	1,62	0,98	6,54

\* SD : écart-type ; SEC : erreur de calibration ; SECV : erreur de validation croisée ; RPDcv : SD/SECV

TABLEAU 1 : **Caractéristiques de l'équation "sorgho vert"**.

TABLE 1 : **Specifications for the 'green sorghum' equation.**

Paramètre	Statistiques de la population de validation*						Stat. de validation* de l'équation "sorgho"					
	N	Moy.	SD	Min.	Max.	SEL	RMSEP	Biais	SEP	Pente	R <sup>2</sup>	RPDval
NDF	44	52,45	5,25	40,90	61,59	0,72	2,01	0,68	1,91	0,85	0,90	2,62
ADF	45	26,50	3,34	19,33	32,67	0,43	1,31	-0,06	1,33	0,96	0,84	2,55
DCs	45	61,81	5,37	51,68	73,37	0,64	2,71	0,68	2,66	0,93	0,76	1,98
MAT	38	9,12	2,15	4,46	12,25	0,20	0,48	-0,27	0,41	1,09	0,97	4,47
Cdr	49	5,58	0,86	3,57	7,74	0,06	0,66	-0,02	0,67	0,86	0,42	1,31

\* SD : écart type ; SEL : erreur de laboratoire ; RMSEP : erreur de prédiction ; SEP : erreur de prédiction corrigée du biais ; R<sup>2</sup> : coefficient de corrélation de validation ; RPDval : SD/RMSEP

TABLEAU 2 : Validation de l'équation "sorgho vert" à l'aide d'échantillons récoltés en 2008.

TABLE 2 : Validation of the 'green sorghum' equation based on samples harvested in 2008.

Application de l'équation "maïs"						
Paramètre	RMSEP	Biais	SEP	Pente	R <sup>2</sup>	SD/RMSEP
NDF	2,07	-0,83	1,92	0,99	0,87	2,54
ADF	2,28	1,89	1,29	1,01	0,85	1,47
DCs	2,91	-0,03	2,94	1,10	0,70	1,85
MAT	1,05	-0,89	0,56	1,25	0,97	2,05
Cdr	0,87	0,18	0,86	0,51	0,11	0,99

\* RMSEP : erreur de prédiction ; SEP : erreur de prédiction corrigée du biais ; R<sup>2</sup> : coefficient de corrélation de validation ; RPDval=SD/RMSEP

TABLEAU 3 : Application de l'équation "maïs" sur le set de validation sorgho (récolte 2008).

TABLE 3 : Application of the 'maize' equation on the 'sorghum' validation sample (2008).

chaque paramètre chimique. Les valeurs de SEC obtenues s'approchent des valeurs décrites dans la littérature en ce qui concerne le développement d'équations sur le maïs plante entière : SEC NDF=1,87% ; SEC ADF=1,04% ;

SEC DCs=1,37% ; SEC MAT=0,26% ; SEC Cdr=0,38% et SEC Amidon=1,84% (DARDENNE *et al.*, 1993). Par ailleurs, la différence relativement faible entre le SEC et le SECV (8% en moyenne et au maximum 13% pour la digestibilité) suggère que **le modèle est relativement stable**. Enfin, le RPD obtenu varie de 3,9 (DCs) à 6,5 (Amidon), ce qui permet d'affirmer que le modèle est **de bonne qualité**.

Le tableau 2 présente **les résultats de validation de l'équation "sorgho vert"** à l'aide des échantillons de sorghos récoltés en 2008. La distance de Mahalanobis moyenne (DARDENNE, 2010 ; GH : distance moyenne entre la valeur de chaque échantillon et le centre de la calibration) est correcte (<3) et indique que le modèle est approprié pour les échantillons analysés. La distance NH (Neighbourhood H ou distance par rapport au plus proche voisin de la base) est élevée, 0,917 (>0,6), ce qui s'explique car ces échantillons sont issus d'années et/ou de lieux différents. Il ressort **une bonne prédiction pour les**

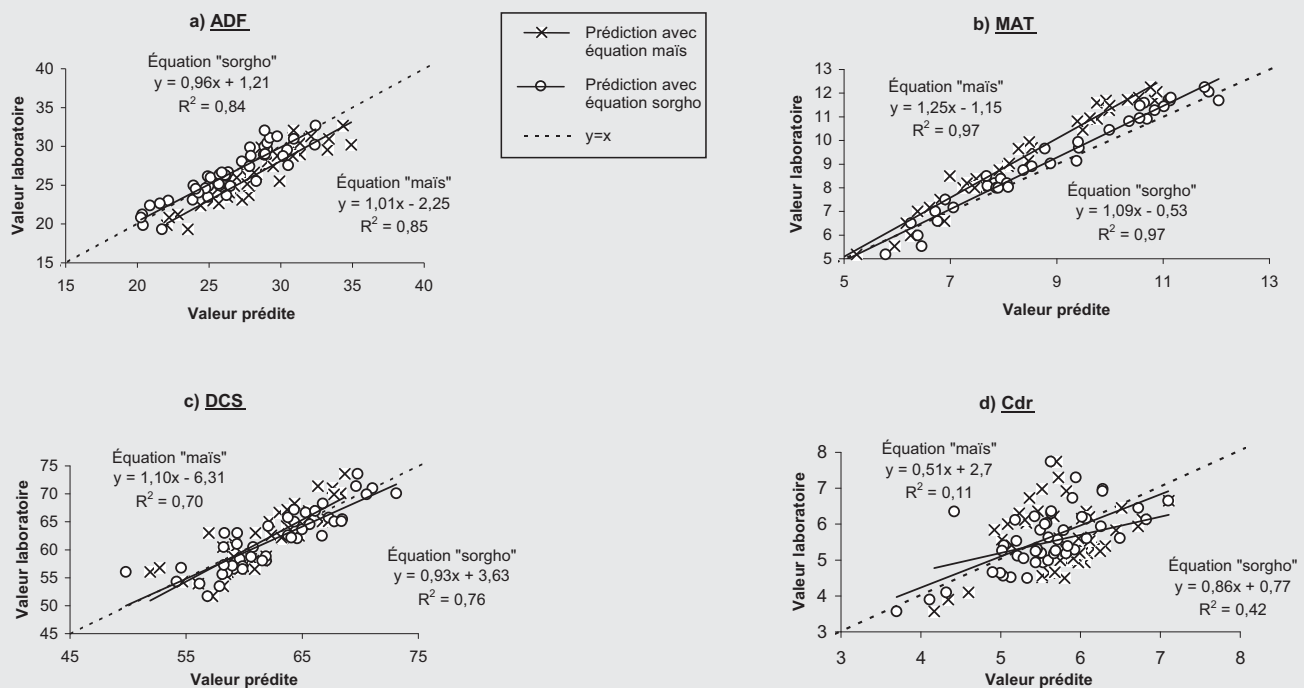


FIGURE 1 : Comparaison des prédictions obtenues avec l'équation "maïs" et l'équation "sorgho" sur le set de validation de sorgho pour les paramètres a) ADF, b) MAT, c) digestibilité (DCs) et d) cendres (Cdr).

FIGURE 1 : Predictions obtained using the 'maize' equation vs. the 'sorgho' equation on the sorgho validation sample for a) ADF, b) crude protein (MAT), c) digestibility (DCs) and d) ash content (Cdr).

**critères NDF, ADF et MAT, une assez bonne prédiction pour la DCs** (caractérisée par un RMSEP un peu élevé mais une absence de biais). La teneur en cendres (Cdr) est moins bien prédite, ce qui est classique avec la méthode NIRS car les minéraux n'absorbent pas dans l'infrarouge (VAN KEMPEN, 2001).

Le tableau 3 présente les **résultats de validation** obtenus à l'aide des 49 échantillons sur une équation "maïs plante entière". Celle-ci donne des performances correctes pour les critères NDF et DCs (le RMSEP est proche de celui obtenu avec l'équation "sorgho" et le biais est faible pour la DCs). Cependant, elle semble moins adaptée pour l'ADF et pour les MAT, critères pour lesquels le RMSEP et le biais sont élevés.

Afin de comparer plus finement les performances des équations "sorghos" et "maïs" sur le set de validation, des graphiques comparant les prédictions pour les critères ADF, DCs, MAT et Cdr ont été tracés (figures 1a, b, c et d). Pour les critères ADF et MAT, les prédictions obtenues avec l'équation "sorgho" s'approchent de la droite  $y=x$  tandis que les prédictions obtenues avec l'équation "maïs" donnent un biais important. En ce qui concerne le critère de la digestibilité, les deux équations présentent un léger biais de sens opposé. Au vu de tous ces résultats, nous pouvons affirmer que **l'équation "sorgho" développée** dans cette étude **donne des résultats satisfaisants et plus précis que ceux obtenus avec l'équation "maïs"**.

**Pour conclure**, nous pouvons dire que l'équation "sorgho" développée est un outil qui permet d'estimer la valeur alimentaire d'un grand nombre d'échantillons de sorgho et qui pourra être utilisée pour classer des variétés différentes. La validation effectuée sur un set issu d'une année de récolte différente montre que **l'équation développée offre déjà une bonne robustesse**. Cette équation peut être améliorée en augmentant la gamme de diversité. Ceci est actuellement en cours par l'addition d'échantillons obtenus à Lusignan de 2008 à 2010 avec une offre variétale renouvelée (en incluant en particulier des sorghos plus tardifs et des variétés porteuses d'une mutation bmr). Par ailleurs, le projet engagé avec le CTPS Sorgho<sup>1</sup> permettra l'ajout d'espèces supplémentaires issues de lieux de récolte différents. Il sera également possible de comparer les réponses de divers appareils SPIR. Enfin, il faudra également confronter cette base d'une part avec des données obtenues sur animaux et d'autre part avec des mesures de la valeur alimentaire de sorghos ensilés (étude en cours).

Affiche scientifique présentée aux Journées de l'A.F.P.F.,  
"Récolte et valorisation des fourrages conservés :  
les clés de la réussite",  
les 30-31 mars 2011.

**Remerciements** : Les auteurs remercient Catherine Lévêque, Corinne Melin et Véronique Menanteau pour leur aide technique.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AOAC (1996) : "AOAC Official Method 968.06 Protein (Crude) in animal feed. Dumas Method", *AOAC Official Methods of Analysis*, 4, 13-15.
- AUFRÈRE J., MICHALET-DOREAU B. (1983) : "In vivo digestibility and prediction of digestibility of some by-products", *EEC seminar*, Melle Gontrode, 26-29 September, 25-33.
- DARDENNE P. (2010) : "Some considerations about NIR spectroscopy: Closing speech at NIR- 2009", *Nirs News*, vol. 21, 1, 8-14.
- DARDENNE P., ANDRIEU J., BARRIÈRE Y., BISTON R., DEMARQUILLY C., FEMENIAS N., LILA M., MAUPETIT P., RIVIERE F., RONSIN T. (1993) : "Composition and nutritive value of whole maize plants fed fresh to sheep. 2. Prediction of the in vivo organic matter digestibility", *Annales de Zootechnie*, 42, 251-270.
- SHENK J.S., WESTERHAUS M.O., HOOVER M.R. (1979) : "Analysis of forages by infrared reflectance", *J. of Dairy Sci*, 62, 807-812.
- SINNAEVE G., DARDENNE P., AGNESSENS R., BISTON R. (1994) : "The use of near infrared spectroscopy for the analysis of fresh grass silage", *J. of Near Infrared Spectroscopy*, 2, 79-84.
- VAN KEMPEN T. (2001) : "Infrared technology in animal production", *World's Poultry Sci. J.*, 57, 29-48.
- VAN SOEST P.J., WINE R.H. (1967) : "Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. IV. Determination of plant cell-wall constituents", *J. of the AOAC*, 50, 50-55.

1 : coordinateur : Bernard Aizac, GEVES Le Magneraud