

FONCTIONS D'AJUSTEMENT POUR L'ESTIMATION DE LA PRODUCTION FOURRAGÈRE HERBACÉE DES PARCOURS NATURELS DU SÉNÉGAL À PARTIR DU NDVI S10 DE SPOT-VEGETATION

DIOUF A. A. ^(1, 2), DJABY B. ⁽³⁾, DIOP M. B. ⁽²⁾, WELE A. ⁽²⁾,
NDIONE J.-A. ⁽²⁾, TYCHON B. ⁽¹⁾

(1) Unité Eau Environnement et Développement, Université de Liège, 185 avenue de Longwy B-6700, Arlon, Belgique [abdoulaziz.diouf@doct.ulg.ac.be ; bernard.tychon@ulg.ac.be]

(2) Centre de Suivi Écologique de Dakar, rue Léon Gontran Damas, BP 15532, Dakar-Fann, Sénégal, [aziz.diouf@cse.sn ; bamba.diop@cse.sn ; wele@cse.sn ; jacques-andre.ndione@cse.sn]

(3) International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT)-Niamey, BP 12404 Niamey, Niger [b.djaby@cgiar.org]

Résumé – Face à la situation actuelle de changement climatique et ses conséquences sur l'homme et les ressources naturelles, les Systèmes d'Alerte Précoce (SAP) sur le disponible fourrager en zones pastorales constituent des stratégies essentielles dans la lutte contre l'insécurité alimentaire, notamment au niveau des pays du Sahel ouest-africains comme le Sénégal. L'évaluation du stock de fourrage s'y effectue habituellement à partir d'une régression linéaire entre les données de biomasse mesurée sur le terrain et l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) issu du satellite SPOT-VEGETATION. Mais, compte tenu de la nature non-linéaire de la relation NDVI-biomasse herbacée, cinq autres fonctions d'ajustement sont testées afin de déterminer celles qui traduisent au mieux cette relation. Les données de biomasse ont été collectées au niveau de cinquante-et-un Sites de Contrôle au Sol (SCS) dont trente-six ont servi à la calibration et quinze pour évaluer la précision des modèles. Les variables utilisées sont le NDVI moyen et le NDVI maximum, enregistrés au cours de la saison. Les résultats obtenus montrent que les modèles Exponentiel et Puissance sont les plus cohérents et précis pour l'estimation de la biomasse herbacée à partir du NDVI. Toutefois, cette approche empirique par régression simple reste globalement imprécise pour l'évaluation de la biomasse herbacée au Sénégal vu les valeurs relativement élevées du RMSE qui varient entre 324,07 et 858 kg/ha selon l'année.

Mots-clés : modèle, régression, biomasse, NDVI, SPOT.

Abstract – Simple regression functions for estimating herbaceous fodder production in Senegal rangelands from the S10 NDVI of SPOT-VEGETATION. In the current context of climate change and its impact on human and natural resources, Early Warning Systems (EWS) on the available forage in pastoral areas are key strategies in the fight against food insecurity, especially in the west African Sahel countries such as Senegal. The stock assessment of forage is usually done from a linear regression between biomass data measured on the field and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) derived from SPOT-VEGETATION satellite. But, given the non-linear character of the NDVI-fodder production relationship, five other adjustment functions are tested to determine which one best express this relationship. The biomass data were collected in fifty-one sites from ground control (SCS) of which thirty-six were used for calibration and fifteen to appreciate the model accuracy. The used variables are the average and maximum NDVI recorded during the season. The results show that the Exponential model and Power model are more consistent and accurate than Linear model for the estimation of herbaceous biomass from NDVI. However, this empirical approach by simple regression remains imprecise to evaluate herbaceous biomass in Senegal with relatively high values of RMSE ranging between 324.07 and 858 kg / ha.

Keywords: model, regression, biomass, NDVI, SPOT.

Introduction

Dans le passé, de nombreuses études ont eu à utiliser la régression linéaire afin de montrer la relation entre la production de biomasse, en particulier herbacée, et l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) dans les parcours naturels du Sahel (Tucker *et al.*, 1983 ; Tucker *et al.*, 1985 ; Diallo *et al.*, 1991 ; Prince, 1991 ; Bégué *et al.*, 2000 ; Diouf et Lambin, 2001). Actuellement, le Centre de Suivi Écologique (CSE) de Dakar et le Ministère de l'Élevage et des Industries Animales (MEIA) du Niger utilisent cette approche par ajustement linéaire pour l'évaluation annuelle de la production fourragère des parcours naturels, respectivement au Sénégal et au Niger.

Toutefois, la nature strictement linéaire de la relation entre la biomasse végétale et le NDVI n'a jamais été démontrée. En fait, le NDVI est un indice de végétation non-linéaire (Santin-Janin *et al.*, 2009 ; Bégué *et al.*, 2011) qui sature facilement (Xiaoping *et al.*, 2011) lorsque la densité de la végétation ou la production primaire devient très importante.

Ainsi, le but de cette étude est de tester six fonctions d'ajustement — dont la fonction linéaire — afin d'en déduire celle(s) qui s'adapte(nt) le mieux à la relation entre l'indice de végétation par différence normalisée issu des images décennales du satellite SPOT-VEGETATION et les productions de biomasse herbacée recueillies au sol.

1. Matériel et méthodes

1.1. Les sites de contrôle au sol

Au nombre de cinquante-et-un, les Sites de Contrôle au Sol (SCS) utilisés ont été mis en place dans les parcours naturels du Sénégal par le Centre de Suivi Écologique (CSE) de Dakar. Ils sont situés dans des zones de végétation relativement homogènes avec une superficie d'au moins 3 km x 3 km, soit 9 km² de superficie, ce qui correspond approximativement à neuf pixels d'une image SPOT-VEGETATION (Fig. 1). Ces sites sont représentatifs des principaux types géomorphologiques (Diallo *et al.*, 1991) et faciès de végétation de la zone étudiée.

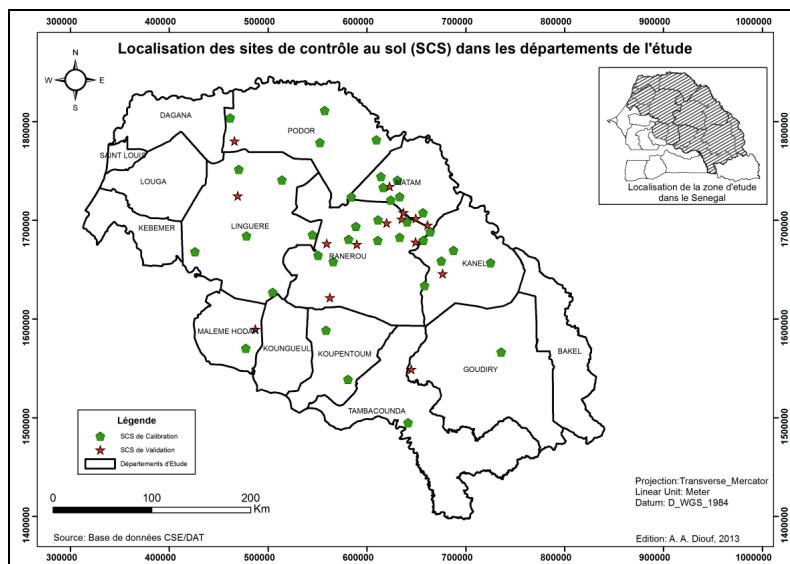


Figure 1 : Localisation des sites de contrôle au sol dans les départements de l'étude

1.2. Les données satellitaires et de biomasse herbacée

Les variables utilisées ont été calculées à partir d'images décennales de l'indice de végétation par différence normalisée (ou NDVI), issues du capteur VEGETATION monté à bord du satellite SPOT5 (Satellite Pour l'Observation de la Terre) mis en orbite depuis 2002. Il s'agit du NDVI moyen (NDVI_i) et du NDVI maximum de la saison (NDVI_{pk}). Tandis que le NDVI_i a été calculé avec les images de la première décennie d'août à la troisième décennie d'octobre, le NDVI_{pk} a été déterminé à l'aide du logiciel TIMESAT (Eklundh et Jönsson, 2011), le début et la fin de la saison étant choisis respectivement à 20 et 50 % de l'amplitude du profil saisonnier de l'indice. Il faut noter que ces deux variables sont actuellement utilisées respectivement par le Centre de Suivi Écologique de Dakar et le Ministère de l'Élevage et des Industries Animales (MEIA) du Niger.

Les données de biomasse herbacée ont été collectées de 2006 à 2009 à la fin de la saison de croissance végétale, soit vers la fin du mois d'octobre de chaque année. La technique de collecte utilisée est celle de la ligne d'échantillonnage stratifié, développée au Centre International Pour l'Élevage en Afrique (CIPEA) pour le suivi des écosystèmes pastoraux du Gourma malien (Diouf *et al.*, 1998).

1.3. Fonctions d'ajustement, cohérence et précision des modèles

Pour modéliser la production de biomasse herbacée, six fonctions d'ajustement, dont la fonction linéaire couramment utilisée, ont été testées (Tabl. 1). Les régressions ont été faites sur les données de NDVI saisonnier et de biomasse herbacée disponibles.

Afin de vérifier si les modèles obtenus sont cohérents et traduisent bien la réalité, ils ont été testés dans l'intervalle 0,1 - 0,7 qui, selon Jarlan *et al.* (2008), comprend des valeurs typiques de l'indice de végétation issu du satellite SPOT-VEGETATION traduisant la présence de végétation. Ainsi, un modèle est considéré comme cohérent lorsque les biomasses estimées évoluent dans le même sens que les valeurs de l'indice dans cet intervalle avec des productions raisonnables qui peuvent être justifiées par les mesures historiques au sol.

La précision des modèles retenus a été appréciée par régression simple entre les productions estimées et celles mesurées au sol au niveau de 15 SCS non utilisés lors de la calibration (ajustement).

Tableau 1 : Équations de base des fonctions d'ajustement (*source : IBM, 2011*)

| Noms | Équations |
|----------------------|---------------------------------------------------|
| Simples | |
| Cubique | $Y = b_0 + (b_1 * X) + (b_2 * X^2) + (b_3 * X^3)$ |
| Puissance | $Y = b_0 * (X^{b_1})$ |
| Exponentiel | $Y = b_0 * (e^{(b_1 * X)})$ |
| Linéaire | $Y = b_0 + (b_1 * X)$ |
| Logarithmique | $Y = b_0 + (b_1 * \ln(X))$ |
| Quadratique | $Y = b_0 + (b_1 * X) + (b_2 * X^2)$ |

avec Y = production de biomasse herbacée ; X = NDVI moyen ou maximum

2. Résultats

Les modèles Exponentiel et Puissance montrent les coefficients de détermination (R^2) les plus élevés, généralement supérieurs à 0,80 (Tabl. 2). À l'inverse, les fonctions Linéaire et Logarithmique donnent les plus faibles valeurs de R^2 . Pour ces deux fonctions, les valeurs du R^2 les plus importantes sont observées avec la variable NDVI_{pk} et

sont respectivement de 0,59 et 0,52. Les fonctions Quadratique et Cubique, quant à elles, possèdent des R^2 intermédiaires mais nettement plus élevées pour la fonction Cubique. En plus de leur coefficient de détermination favorable, les fonctions Exponentiel et Puissance donnent également les modèles statistiquement les plus plausibles parmi les six étudiés, au sens du test F de Fischer (avec un seuil de significativité de 0,05).

Tableau 2 : Modèles d'ajustement de la biomasse herbacée avec les variables de croissance végétale NDVIi et NDVIpk de 2006 à 2009

| Variable | Modèle | 2006 | | 2007 | | 2008 | | 2009 | |
|----------|---------------|----------------|--------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|--------------|
| | | R ² | F | R ² | F | R ² | F | R ² | F |
| NDVIi | Cubique | 0,66 | 20,43 | 0,55 | 13,19 | 0,52 | 11,41 | 0,46 | 9,01 |
| | Exponentielle | 0,81 | 73,68 | 0,88 | 126,21 | 0,87 | 109,40 | 0,82 | 75,69 |
| | Linéaire | 0,46 | 29,54 | 0,52 | 36,78 | 0,50 | 33,41 | 0,21 | 9,25 |
| | Logarithmique | 0,40 | 23,04 | 0,48 | 31,12 | 0,46 | 29,28 | 0,18 | 7,49 |
| | Puissance | 0,80 | 66,09 | 0,88 | 125,16 | 0,86 | 107,95 | 0,81 | 70,62 |
| | Quadratique | 0,59 | 23,92 | 0,55 | 20,12 | 0,51 | 17,49 | 0,35 | 8,76 |
| NDVIpk | Cubique | 0,72 | 27,92 | 0,70 | 25,05 | 0,58 | 15,01 | 0,44 | 8,47 |
| | Exponentielle | 0,82 | 78,06 | 0,91 | 182,72 | 0,88 | 128,69 | 0,82 | 77,47 |
| | Linéaire | 0,46 | 28,62 | 0,59 | 48,76 | 0,53 | 38,17 | 0,23 | 9,98 |
| | Logarithmique | 0,39 | 21,85 | 0,52 | 36,23 | 0,49 | 32,03 | 0,19 | 8,05 |
| | Puissance | 0,80 | 67,95 | 0,91 | 166,60 | 0,88 | 123,55 | 0,81 | 72,41 |
| | Quadratique | 0,60 | 24,95 | 0,67 | 33,89 | 0,58 | 22,40 | 0,38 | 9,92 |

Le modèle Cubique donne généralement une évolution sinusoïdale (Fig. 2 a) et le modèle Quadratique une évolution parabolique de la production herbacée estimée lorsque le NDVI augmente. Ainsi, ces deux modèles peuvent simuler des productions de biomasse qui diminuent lorsque l'indice augmente, ce qui n'est pas conforme à la réalité. Le modèle Linéaire, au même titre que le modèle Logarithmique, estime mal la biomasse herbacée lorsque les valeurs de la variable considérée sont inférieures à 0,3 (Fig. 2 b). Avec ces valeurs, ils donnent des productions négatives, ce qui est contraire à la réalité et peut gêner dans l'utilisation des résultats, par exemple pour faire le bilan fourrager. Le modèle Puissance semble être le plus correct pour la modélisation de la biomasse herbacée à partir du NDVI (Fig. 2 d). C'est le seul parmi les six utilisés à avoir respecté, indépendamment des variables, la condition du test de cohérence définie dans la section 1.3. La biomasse estimée avec ce modèle s'annule lorsque l'indice est nul, contrairement au modèle Exponentiel qui peut donner jusqu'à 300 kg/ha avec la même valeur de l'indice. Cependant, la régression entre les estimations et les mesures de terrain au cours des quatre années de l'étude montre que le modèle Exponentiel est globalement plus précis que celui de Puissance qui l'est plus que le modèle Linéaire, pour l'ensemble des deux variables (Tabl. 3).

Toutefois, ces modèles de régression simple restent globalement imprécis avec des RMSE qui varient entre 324,07 et 858 kg/ha suivant les années. Ceci vient confirmer l'imprécision notée par Crépeau *et al.* (2003) sur ces relations empiriques.

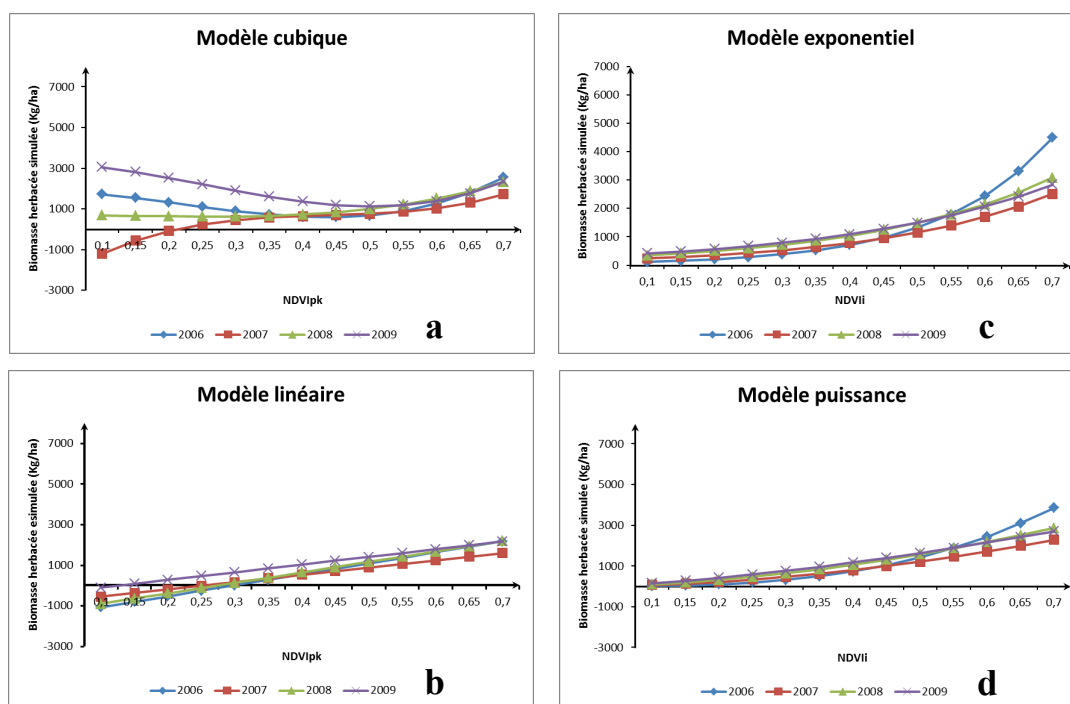


Figure 2 : Comportement de quelques modèles de régression linéaire et non-linéaire pour l'estimation de la biomasse herbacée de 2006 à 2009, dans le domaine des valeurs typiques du NDVI (0,1 - 0,7) en zones de végétation : a-b: NDVI maximum ; c-d : NDVI moyen

Tableau 3 : Précision des modèles Linéaire, Puissance et Exponentiel pour l'estimation de la biomasse herbacée à partir des NDVI moyen et maximum de la saison de croissance des années 2006 à 2009

| Année | | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |
|--------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| NDVII | Modèle | R ² | R ² | R ² | R ² |
| | Exponentielle | 0,770 | 0,265 | 0,720 | 0,383 |
| | Puissance | 0,720 | 0,276 | 0,690 | 0,379 |
| | Linéaire | 0,610 | 0,279 | 0,660 | 0,378 |
| NDVIpk | Modèle | R ² | R ² | R ² | R ² |
| | Exponentielle | 0,800 | 0,310 | 0,710 | 0,300 |
| | Puissance | 0,750 | 0,300 | 0,660 | 0,270 |
| | Linéaire | 0,590 | 0,270 | 0,570 | 0,260 |

Conclusions et perspectives

L'évaluation du stock de fourrage des parcours naturels en fin de saison s'effectue habituellement au Sénégal par régression linéaire entre les données de biomasse végétale mesurées sur le terrain et l'indice de végétation satellitaire par différence normalisée (NDVI). Compte tenu de la nature non-linéaire du NDVI, six fonctions d'ajustement — dont celle linéaire — ont été testées afin de déterminer celles qui permettent de faire les estimations les plus fiables.

Les résultats obtenus montrent que le modèle Exponentiel est globalement plus précis que le modèle Puissance qui l'est plus que le modèle Linéaire, avec les variables NDVI moyen et NDVI maximum. Ceci permet de confirmer l'hypothèse selon laquelle le modèle Linéaire n'est pas le plus adapté à l'estimation de la biomasse herbacée des parcours naturels du Sénégal. Les régressions Exponentielle et Puissance peuvent être utilisées à la place de celle Linéaire pour permettre, d'une part d'augmenter la précision des estimations, et d'autre part

d'éviter d'avoir des valeurs de production négatives qui peuvent gêner dans l'interprétation et l'utilisation des résultats, notamment pour réaliser le bilan fourrager des zones pastorales.

Cependant, la méthode par régression simple est globalement imprécise avec des RMSE relativement élevées qui varient entre 324,07 et 858 kg/ha suivant les années. Face à cette situation, la prochaine étape de notre recherche sera de tester une approche par régression multiple utilisant les séries historiques de biomasse herbacée et d'autres variables satellitaires et agrométéorologiques. Les modèles évalués avec cette approche devront permettre non plus d'estimer mais de prévoir la production fourragère herbacée afin de répondre plus efficacement aux besoins actuels des Systèmes d'Alerte Précoce sur la sécurité alimentaire.

Remerciements

Ils vont à l'endroit de la Direction du Centre de Suivi Écologique (CSE) de Dakar, de l'Unité Eau Environnement et Développement du Campus Environnement de l'ULg et des coordonnateurs du Projet AGRICAB pour leur appui financier dans l'exécution de ces travaux.

Références bibliographiques

- Bégué A., Chehbouni G., Escadafal P., Heilmann P., Mougenot B., Nouvellon Y., Qi J., Royer A. and Watts C., 2000: Applications of VEGETATION data to resource management in arid and semi-arid rangelands. CIRAD, IRD, USDA, AGRHYMET, CESBIO, IMADES, Montpellier, France, 7 p.
- Bégué A., Vintrou E., Ruelland D., Claden M., Dessay N., 2011: Can a 25-year trend in Soudano-Sahelian vegetation dynamics be interpreted in terms of land use change? A remote sensing approach. *Global Environmental Change*, **21**, 413-420.
- Crépeau C., Bennouna T., Bicheron P. *et al.*, 2003 : Suivi de la végétation en zone sèche par des produits d'information dérivés de l'imagerie spatiale. *Sécheresse en ligne*, 2003, **1E** (1).
- Diallo O., Diouf A., Hanan N.P., Ndiaye A. and Prévost Y., 1991: AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa: 1987-1988. *International Journal of Remote Sensing*, **12**, 1 259-1 279.
- Diouf A., Sall M., Wélé A. et Dramé M., 1998 : Méthode d'échantillonnage de la production primaire sur le terrain. Guide méthodologique. *Centre de suivi écologique de Dakar*, 9 p.
- Diouf A. and Lambin E.F., 2001: Monitoring land-cover changes in semi-arid regions: remote sensing and field observations in the Ferlo, Senegal. *Journal of Arid Environments*, **48**, 129-148.
- Eklundh L. and Jönsson P., 2011: Timesat 3.1, Manuel software. 79 p.
- IBM Corporation, 2011: *IBM SPSS Statistics Base 20*. 345 p.
- Jarlan J., Mangiarotti S., Mougouin E., Mazzega P., Hiernaux P.H.Y. and Le Dantec V., 2008: Assimilation of SPOT/VEGETATION NDVI data into a Sahelian vegetation dynamics model. *Remote sensing of environment*, **112**, 1 381-1 394.
- Prince S.D., 1991: Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981-1988. *International Journal of Remote Sensing*, **12**, 1 301-1 311.
- Santin-Janin H., Garel M., Chapuis J.-L., Pontier D., 2009: Assessing the performance of NDVI as a proxy for plant biomass using non-linear models: a case study on the Kerguelen archipelago. *Polar Biology*, **32**, 861-871.
- Tucker C.J., Vanpraet C., Boerwinkel E. and Gaston A., 1983: Satellite remote sensing of total dry matter production in the Senegalese Sahel. *Remote Sensing of Environment*, **13**, 461-474.
- Tucker C.J., Vanpraet C.L., Sharman M.J. and Itterstum G.V., 1985: Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the senegalese sahel: 1980-1984. *Remote Sensing of Environment*, **17**, 233-249.
- Xiaoping W., Ni G., Kai Z. and Jing W., 2011: Hyperspectral Remote Sensing Estimation Models of Aboveground Biomass in Gannan Rangelands. *Procedia Environmental Sciences*, **10**, 697-702.