

ÉVALUATION DES RESSOURCES PASTORALES AU SAHEL NIGÉRIEN À L'AIDE DES DONNÉES NDVI ISSUES DE SPOT-VEGETATION ET MODIS

Issa GARBA¹, Bakary DJABY², Illa SALIFOU³, Amadou BOUREIMA⁴, Ibra TOURE⁵, Bernard TYCHON⁶

1 Doctorant à l'Université de Liège (ULg) ; Expert en agro pastoralisme au Centre Régional AGRHYMET (CRA), BP : 11011 Niamey Niger, téléphone +227 90682639,

E-mail : Is.garba@gmail.com ou g.issa@agrhyment.ne

2 Chercheur associé à Université de Liège (ULg), téléphone : +32497323482,

email : bakary.djaby@gmail.com ou b.djaby@ulg.ac.be

3 Chercheur à l'Institut des Radio-Isotopes de Niamey (IRI), Université Abdou Mounouni,

BP : 1727 Niamey NIGER

e-mail : isalifou@yahoo.fr

4 Chef de la Division pastorale au ministère de l'Élevage et des Industries Animales

e-mail : aboreimas@yahoo.fr

5 Chercheur au Centre de coopération internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Ouagadougou BURKINA FASO

email : ibra.toure@cirad.fr

6 Chargé de cours à l'Université de Liège (ULg), Faculté des sciences et gestion de l'environnement,

email : Bernard.Tychon@ulg.ac.be

RESUMÉ

L'étude a été réalisée dans la zone pastorale du Niger, elle se propose de : tester la stabilité du modèle d'estimation de la biomasse du Ministère de l'Élevage et des Industries Animales (MEIA) du Niger ; puis de comparer les performances de l'intégrale et du maximum du NDVI de SPOT VEGETATION et eMODIS à l'aide des données réelles collectées de 2001 à 2012 par MEIA. La méthode de régression linéaire simple est utilisée pour calculer les coefficients de détermination R^2 et les erreurs quadratiques sur la série (RMSE), par zone bioclimatique puis année par année. Les résultats montrent des R^2 variant, suivant les années, de 0,52 à 0,73, de façon très significative ($P < 0.0001$). Ce coefficient de détermination est plus élevé dans les zones saharienne et nord sahélienne comparé à la zone sahélienne typique. Les RMSE annuelles varient entre 120 et 460 Kg.MS.ha⁻¹. Les tests non paramétriques de comparaison de moyenne (Test de Wilcoxon et des signes) ne mettaient pas en évidence de différence significative entre SPOT VEGETATION et eMODIS (intégrale ou maximum). Cette possibilité d'intercomparabilité des indices provenant de différents capteurs permet aux utilisateurs d'assurer la production sans interruption avec une possibilité d'analyse convergente si l'un des deux capteurs était indisponible.

MOTS-CLÉS

NDVI, SPOT VEGETATION, EMODIS, BIOMASSE, MEIA

Article reçu le 3 avril 2015, accepté définitivement le 26 août 2015

1. INTRODUCTION

L'élevage joue un rôle économique très important au Niger et constitue la 2^e recette d'exportation, 36 millions de têtes, pratiqué par 80 % des ménages (MEIA, 2012). Il est pratiqué de façon traditionnelle et basé essentiellement sur l'exploitation des fourrages naturels soumis à de fortes variabilités inter et intra saisonnières. Ceci nécessite de disposer d'outils appropriés de suivi et de gestion de pâturage permettant de : (i) suivre et limiter la dégradation des parcours ; (ii) favoriser une exploitation judicieuse du disponible fourrager ; (iii) orienter les politiques nationales (interventions d'urgence, infrastructures, informations, etc.). L'utilisation de l'imagerie satellitaire combinée aux mesures *in situ* constitue un moyen important d'évaluation quantitative et qualitative des pâturages (Swets et al., 1999, Wylie et al., 1991, Diallo et al., 1991). Au Sahel, le Centre Régional AGRHYMET(CRA), le Ministère de

l'Élevage et des Industries Animales (MEIA) du Niger et le Centre de Suivi Écologique (CSE) du Sénégal réalisent annuellement des estimations de biomasse pour aider les pouvoirs publics à prendre des décisions sur la sécurité alimentaire et la gestion des ressources naturelles. Le modèle du MEIA s'appuie sur l'utilisation de données mesurées au sol combinées à l'intégrale des images d'indice de végétation à différence normalisée (NDVI pour son acronyme en anglais) dont, plusieurs auteurs parmi lesquels (Huete et al., 2002, Justice et al., 1986, Hiernaux et Justice, 1986) ont montré les performances mais aussi les limites dans le suivi et la caractérisation de la végétation à l'échelle globale.

Le NDVI fait partie des nombreux indices dérivés des mesures de réflectances spectrales dans différentes bandes du spectre électromagnétique. Grâce au pigment chlorophyllien des feuilles, la végétation absorbe fortement dans le rouge (0,6 à 0,7 μm) pour réaliser la photosynthèse et réfléchit dans le proche infrarouge (0,7 à 1,1 μm) à cause de la structure anatomique des cellules foliaires. Dès le lancement des premiers satellites d'observation de la terre en 1972 (NOAA AVHRR), avec l'acquisition d'images dans le visible et le proche infrarouge, une exploitation a été faite pour déterminer la distribution spatiale de la végétation. Dans le cas du satellite NOAA, les deux canaux utilisés pour le calcul du NDVI sont le rouge (0,58 à 0,68 μm) et le proche infrarouge (0,73 à 1,10 μm) (Rouse et al., 1973). $NDVI = \frac{PIR-R}{PIR+R}$ où :

PIR= Réflectance dans le proche Infra-Rouge et R = Réflectance dans le Rouge. Pour les capteurs VEGETATION de SPOT-4 et 5, il s'agit des longueurs d'onde (0,61 - 0,68 μm) rouge et (0,78 - 0,89) μm pour le proche infrarouge. Concernant MODIS, la bande du canal rouge se trouve entre 0,62 et 0,67 μm et celle du proche infrarouge entre 0,841 et 0,876 μm . Les acquisitions journalières de NDVI sont en général traitées à travers l'algorithme du « maximum values compositing » pour produire des images décennales (Holben et Fraser, 1984). Le NDVI est devenu très vite un outil précieux de suivi de la végétation. En effet, à l'aide des indices de végétation mesurés par satellite, on peut surveiller les ressources végétales importantes comme les cultures, les pâturages et les forêts à une échelle spatiale appropriée. C'est ce qui a poussé les Européens à construire SPOT VEGETATION embarqué sur SPOT-4 en 1998, puis sur SPOT5 en 2002. Dans le cadre du suivi et de la quantification de la phytomasse, plusieurs études ont été réalisées dans le monde pour le suivi et la quantification des productions primaires. Les séries d'images d'indice de végétation dérivées de MODIS, SPOT VEGETATION, NOAA etc. ont été largement utilisées à travers le monde pour le suivi de la phénologie des cultures (Hmimina et al.,

2013, Soudani et al., 2012, Butt et al., 2011, Beck et al., 2007, Wittemyer et al., 2007, Wagenseil et Samimi, 2006, Lüdeke et al., 1996) et l'estimation des rendements agricoles qui a été faite principalement en combinant les valeurs de NDVI aux rendements mesurés *in situ* (Mkhabela et al., 2011, Fontana et al., 2007, Kastens et al., 2005, Bozzini et Maselli, 2002, Potdar et al., 1999, Rasmussen, 1998). Des estimations de rendements des cultures ont été également réalisées avec succès au Niger et au Burkina Faso à l'aide de séries de NDVI (NOAA AVHRR) croisées aux rendements mesurés *in situ* (Maselli et al., 1993, Groten, 1993). Les indices de végétation provenant de multiples capteurs ont été aussi utilisés pour la prévision des rendements agricoles (Mkhabela et al., 2011, Kastens et al., 2005, Bozzini et al., 2002). Au Sahel, pour le suivi et l'estimation de la production primaire à l'aide des images satellitaires, des études ont été réalisées dès les années 1980 (Gaston et al., 1987, Tucker et al., 1986, Tucker et al., 1985, Tucker et al., 1981). Les études qui ont été à la base du modèle du MEIA sont celles réalisées avec succès au Niger (Wylie et al., 1991) et au Sénégal (Diallo et al., 1991) où il a été établi une corrélation significative entre l'intégrale de la série des images décennales de NDVI de la saison des pluies et la phytomasse mesurée au sol. Ce large spectre d'utilisation des images NDVI permet d'affirmer que cet indice est incontestablement le plus utilisé pour les cultures et les pâturages.

Au regard de l'importance de l'estimation de la biomasse fourragère pour la planification des interventions d'un pays à vocation pastorale comme le Niger, de la quantité importante de données mesurées disponibles dans la base de données du MEIA, de la disponibilité des séries d'images NDVI issues de SPOT VEGETATION et de MODIS, une analyse critique de la méthode du MEIA s'avère nécessaire pour en déterminer les forces et les faiblesses en vue de proposer des pistes d'amélioration.

Ainsi, l'objectif général de cette étude est de contribuer à l'amélioration de la qualité des informations utilisées pour la planification des actions dans le domaine de l'élevage. Il s'agit plus spécifiquement de : (i) contribuer à l'amélioration de la de la méthode d'estimation de la biomasse fourragère au Niger ; (ii) comparer d'une part les performances de l'intégrale et du maximum NDVI, d'autre part celles de SPOT VEGETATION et eMODIS pour l'estimation de biomasse fourragère.

Trois hypothèses ont été formulées dans le cadre de la présente étude : 1) il est possible d'utiliser le NDVI de eMODIS à la place de celui de SPOT VEGETATION ; 2) l'intégrale du NDVI et le Maximum du NDVI peuvent avoir des

performances différentes suivant les années ; 3) il y aurait des différences entre zones bioclimatiques qui ne seraient pas prises en compte en réalisant un modèle unique pour tout le pays.

2. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude correspond à la zone pastorale du Niger définie sur les cartes de l'atlas pastoral de CTA-CIRAD-IEMVT (IEMVT et CTA, 1987). Elle s'étend entre le 13° et le 16° de latitude Nord. L'extension longitudinale varie entre 2° et 12° Est (**figure 1**). Le choix de cette zone du Sahel pour la validation du modèle biomasse est essentiellement lié à la disponibilité des données *in situ*. À l'instar des autres parties sahéliennes, cette zone est caractérisée par une forte variabilité spatio-temporelle des précipitations (Hiernaux et Le Houérou, 2006, Sivakumar et al., 1993) le climat est du type aride avec une pluviométrie normale (1981-2010) variant entre 150 et 300 mm. Sur la base de la série climatologique 1961-1990, la durée de la saison des pluies varie en moyenne entre 60 et 120 jours pour le Sahel central et occidental. Dans le Sahel septentrional et oriental, on observe une moyenne de 40 jours de pluies (AGRHYMET, 2002).

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

La présente étude est réalisée en combinant les données mesurées au sol par le MEIA et les images NDVI de SPOT VEGETATION et de MODIS pour extraire les métriques (intégrale et maximum du NDVI) par site. On a ensuite procédé à des ajustements pour établir les équations du type $Y = ax + b$ et des tests non-paramétriques pour évaluer

les niveaux de signification de la différence entre les paramètres des modèles (**figure 2**).

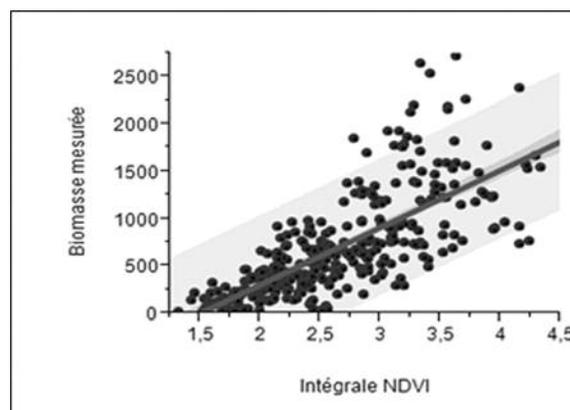


Figure 2 : Ajustement avec l'intégrale NDVI à l'échelle globale.

3.1. Généralités sur l'évaluation au sol

La méthode d'évaluation de la phytomasse annuelle utilisée par le Ministère de l'élevage et des industries animales (MEIA) tire son origine des travaux menés au Niger et au Sénégal (Wylie et al., 1991, Diallo et al., 1991). Elle s'articule autour de trois étapes : la collecte des données *in situ* (sites en zone pastorale) qui se fait par la technique du double échantillonnage ; le traitement des données d'observation de la terre qui consiste à calculer l'intégrale de la série d'images NDVI de la période de croissance végétative ; l'analyse statistique à travers la création d'un modèle de régression utilisant la méthode des moindres carrés linéaires. Les données de biomasse mesurées *in situ* constituent le paramètre y (variable indépendante), l'intégrale NDVI de la saison de croissance

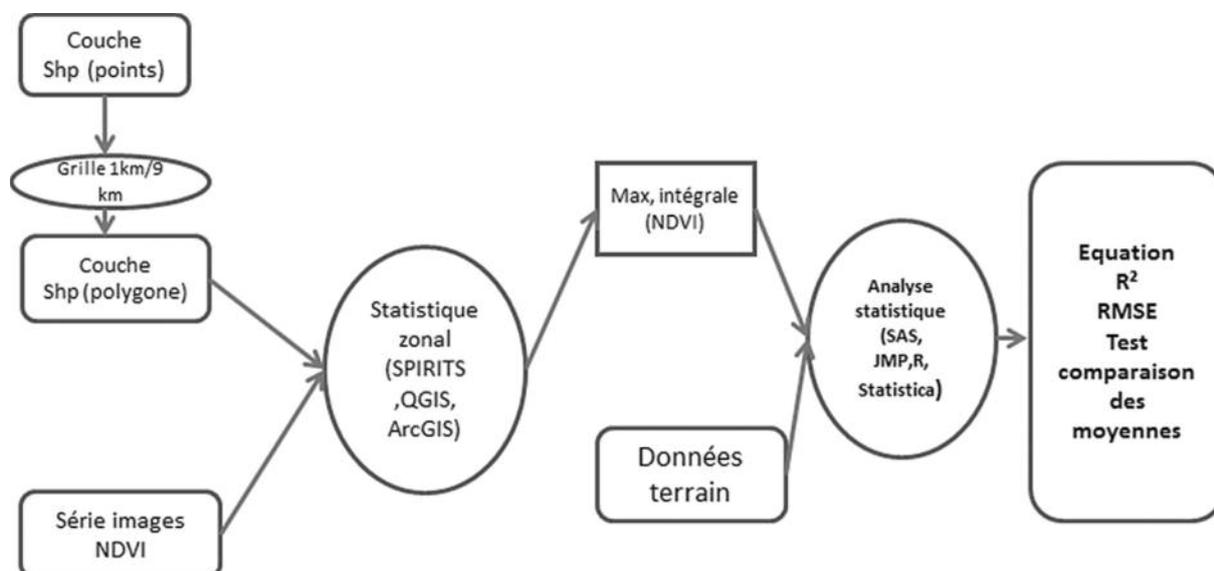


Figure 1 : Modèle schématique du traitement.

végétative est considérée comme paramètre x (variable dépendante). L'équation du type $y = a x + b$ obtenue est utilisée pour estimer la productivité.

L'évaluation de la phytomasse (herbacée et ligneuse) se fait sur le terrain notamment dans la zone pastorale du pays suivant la méthode de double échantillonnage.

La caractérisation des sites est la première étape et est réalisée pour chaque site dans une aire de 3 km de côté. Cette superficie correspond à 9 pixels de résolution spatiale de 1 km². Sur cette surface de 9 km², les éléments clés de la physionomie du paysage sont observés et notés. Ces éléments clés sont le type de sol, la topographie, la végétation, la flore, les perturbations anthropiques. L'ensemble de ces informations permet de définir les unités paysagères qui seront la base de la stratification. Un échantillonnage stratifié permet statistiquement d'obtenir une variance plus faible comparativement à celle d'un échantillonnage aléatoire simple (FAO, 1981). Après les relevés, pour obtenir la productivité moyenne par site, on calcule la somme des productions des échantillons pondérées avec la superficie des unités paysagères. $P_m = (P_1 + P_2 + \dots + P_n) / N$ où : P_m représente la productivité moyenne ; P_1, P_2, \dots, P_n les productivités par échantillon ; N le nombre d'échantillons. L'évaluation de la strate herbacée s'effectue dans des carrés de 0,5 m ou 1m de côté. La méthode consiste à couper toutes les parties aériennes se trouvant dans le carré puis à mesurer le poids en matière sèche. La production moyenne est obtenue par une simple moyenne arithmétique des poids réels obtenus. On distingue trois catégories de carrés de rendements: sol nu, peu enherbée et très enherbée. Si le recouvrement herbacé est supérieur à 75% de la superficie totale de l'unité paysagère (UP), un carré de rendement est placé tous les 100 mètres autrement, on les place de façon aléatoire et représentative à l'intérieur de la strate. (MEIA, 1990).

3.2. Les données biomasse fourragère du MEIA

Les données de biomasse réelle proviennent de la division pastorale du MEIA, elles sont utilisées chaque année pour établir le bilan fourrager sur lequel se fonde la planification des interventions dans le domaine pastoral au Niger. Ces données ont été collectées sur le terrain à travers son dispositif de collecte et de traitement de la biomasse fourragère conformément à la méthode résumée plus haut. Une base de données a été créée et comprend les numéros des sites, les informations attributaires telles que la productivité par an, la position géographique. Pour apprécier la représentativité des sites de mesure de la biomasse fourragère du Niger, nous avons examiné

l'évolution temporelle du nombre et la productivité de sites de 2001 à 2012.

3.3. Les images NDVI utilisées

Le travail a été réalisé avec deux sources d'images d'indice de végétation : les images NDVI de SPOT VEGETATION provenant du VITO et celles d'eMODIS mises à la disposition des utilisateurs par FEWSNET.

3.3.1. Images NDVI de SPOT VEGETATION

Les images NDVI de 2001 à 2012 utilisées dans le cadre de cette étude proviennent des capteurs SPOT VEGETATION (SPOT4 lancé en 1998 et SPOT5 mis en orbite en 2002), elles ont été traitées et mises à la disposition des utilisateurs des pays en développement par le projet DevCoCast. Les synthèses décennales sont effectuées suivant la méthode Maximum Value Compositing (MVC). Cette technique consiste à sélectionner parmi les données journalières de la décennie, la plus grande valeur de NDVI (du pixel) enregistrée. Cette technique permet de minimiser les contaminations atmosphériques et les effets off-nadir (Holben et al., 1986). Les images SPOT VEGETATION sont téléchargées du site en code numérique, c'est-à-dire, codées entre 0 et 255 Digital Number (DN). Pour convertir le DN en Valeur NDVI de type décimal, on applique la formule suivante : $NDVI = 0,004 * DN - 0,1$.

3.3.2. Les images Expedited MODIS (eMODIS)

Les images eMODIS de 2001 à 2012 proviennent du satellite Américain Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS TERRA, lancé en 1999). Elles sont développées par l'U.S. Geological Surveys (USGS) et le centre Earth Resources Observation and Science (EROS) pour le suivi de la végétation en temps quasi réel. La série d'images eMODIS est disponible depuis 2001. Ce sont des synthèses de 5 et 10 jours corrigées des contaminations atmosphériques. Pour améliorer leur qualité, la série d'images NDVI subit un lissage temporel par la méthode développée par (Swets et al., 1999). Les images eMODIS sont téléchargées du site (<http://earlywarning.usgs.gov/fews/africa>) en code numérique, c'est-à-dire, codées entre 0 et 255 Digital Number (DN). Pour convertir le DN en vraies valeurs NDVI, on applique la formule suivante : $NDVI = 0,01 * DN - 1$.

3.4. Extraction de l'intégrale et du maximum de NDVI par Site

Les données de production de biomasse mesurée *in situ* (68 sites) sont celles du Ministère de l'Élevage et des Industries Animales (MEIA) en

format Excel. Elles contiennent essentiellement quatre colonnes (Numéro du Site, Latitude, Longitude et la production en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Une couche géographique ponctuelle de type shapefile a été créée avec les coordonnées des 68 sites. Puis on a généré une grille de polygones de 1 km de côté qui se superpose parfaitement aux pixels des images NDVI de SPOT VEGETATION à l'aide de la fonction fishnet du logiciel ArcGIS ; et superposé la couche des sites sur celle des grilles pour extraire les neufs polygones contigus de 1 km^2 , correspondant à la surface de chaque site ; on a procédé à la fusion des 9 polygones de 1 km de côté de chaque site pour en faire un seul de 3 km de côté ; une jointure spatiale est réalisée pour affecter les attributs de chaque site au polygone correspondant. La couche de ces polygones contenant les informations sur les mesures *in situ* c'est-à-dire les productivités réelles des années 1998 et 2011 est ensuite superposée sur les images NDVI (prétraitées) des années respectives pour en extraire les intégrales moyennes des pixels correspondant à chaque site (**figure 3**). La table issue de cette opération est ensuite utilisée pour faire les analyses statistiques entre la biomasse mesurée *in situ* et le maximum de NDVI pour chaque année. Il est à noter que nous avons utilisé la fonction overlay pour relever les types de sol, les zones agro-écologiques et les zones bioclimatiques correspondant à chaque site.

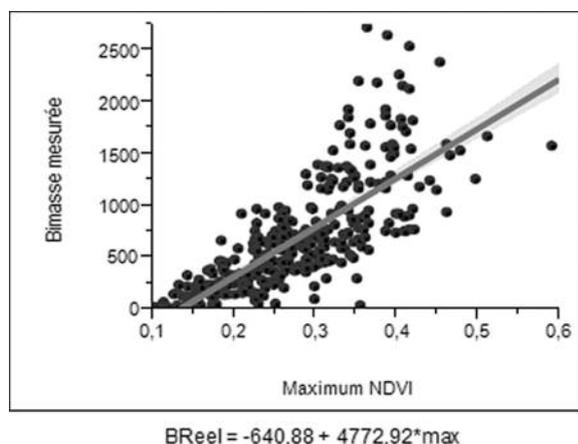


Figure 3 : Ajustement avec le maximum NDVI à l'échelle globale.

3.5. Analyse statistique des données

Les analyses réalisées dans le cadre du présent travail ont consisté à étudier l'évolution interannuelle des coefficients de régression et leur évolution spatiale. Les coefficients issus des régressions sont le R^2 et le RMSE. Les images NDVI de SPOT VEGETATION et eMODIS ont été traitées avec les logiciels SPIRITS (*Software for the Processing and Interpretation of Remotely Sensed Image Time Series*) et ArcGIS pour le Système d'information géographique (SIG). Les

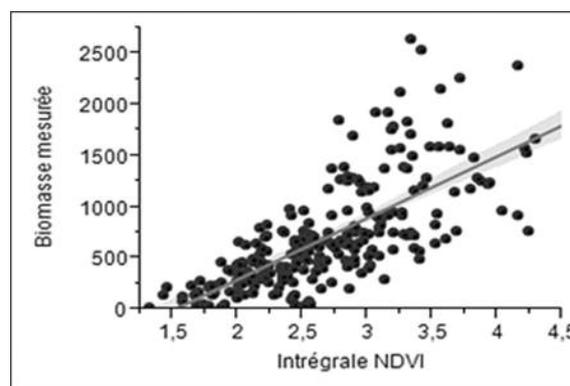
régressions et les tests non-paramétriques de corrélation (tests de Wilcoxon et des signes) ont été faits avec le logiciel SAS-JMP10.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1. Résultats

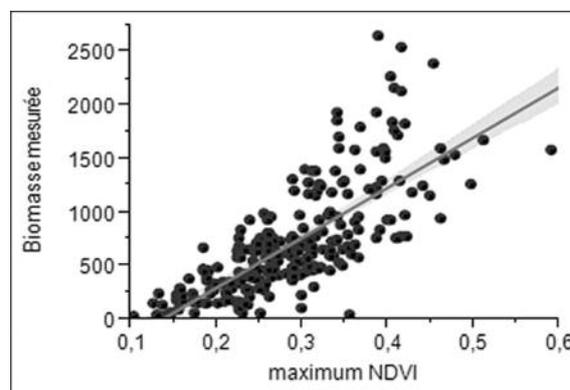
4.1.1. Analyse à l'échelle globale

Les **figures 4 et 5** sont les résultats de la régression linéaire simple entre la biomasse mesurée au sol de 2001 à 2012 et le NDVI (intégrale et maximum) de SPOT VEGETATION. Le **tableau 1** donne les R^2 et les RMSE issus de la régression linéaire simple entre la biomasse mesurée *in situ* et l'intégrale et le maximum NDVI selon les capteurs (VEGETATION et MODIS). La relation est hautement significative ($P < 0,0001$), les coefficients de détermination R^2 des maxima sont supérieurs à ceux des intégrales. La variance de la production de biomasse dans la zone pastorale du Niger est alors expliquée au moins à 51 % et au plus à 56 % par le NDVI (maximum ou intégrale) de SPOT VEGETATION et d'eMODIS. La valeur moyenne du RMSE est de $365 \text{ kg de MS}\cdot\text{ha}^{-1}$ soit une erreur de 52 % par rapport à la moyenne.



$$BReel = -905,71 + 601,74 \cdot \text{int}$$

Figure 4 : Ajustement avec l'intégrale NDVI en zone nord sahélienne.



$$BReel = -648,77 + 4689,35 \cdot \text{max}$$

Figure 5 : Ajustement avec le maximum NDVI en zone nord sahélienne.

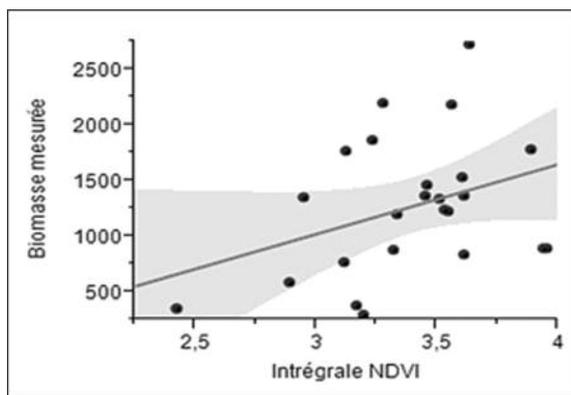
NDVI	R ²	RMSE (kg MS/ha)
eMODIS intégrale	0,51	374
eMODIS maximum	0,53	368
SPOTVGT intégrale	0,53	367
SPOTVGT maximum	0,56	354

Tableau 1 : Comparaison des coefficients de détermination globaux (R²) de la relation entre l'intégrale ou le maximum de NDVI de SPOT VEGETATION et de eMODIS et les biomasses totales (herbes et foliaires ligneuses).

4.1.2. Analyse par zone bioclimatique

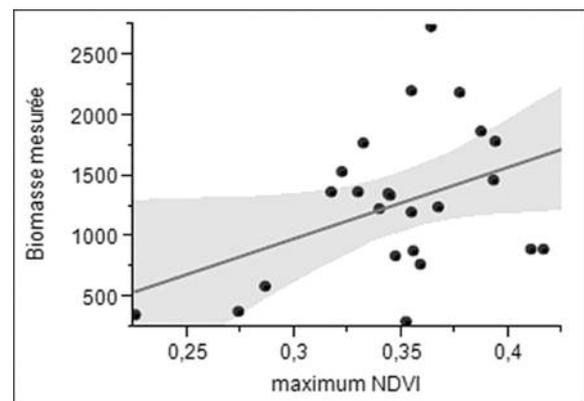
Les résultats de la régression linéaire simple entre la biomasse mesurée au sol allant de 2001 à 2012 et le NDVI (intégrale et maximum) de SPOT VEGETATION selon les zones bioclimatiques sont mis en évidence par les **figures 6 à 11**. Les **tableaux 2 et 3** donnent les R² et les RMSE issus de la régression linéaire simple entre la biomasse mesurée *in situ*, l'intégrale et le maximum NDVI selon les capteurs. La relation est hautement

significative (P < 0, 0001), les coefficients de détermination R² proches de 0,5 pour les zones nord-sahéliennes et saharienne. Par contre le R² est inférieur à 0,2 pour la partie sahélienne. La variance de la production de biomasse dans la zone pastorale du Niger n'est donc expliquée qu'à un peu plus de 50 % par le NDVI (maximum ou intégrale) qu'il soit de SPOT VEGETATION ou d'eMODIS dans les zones nord-sahéliennes et sahariennes. En revanche, elle est faiblement expliquée en zone sahélienne. Les valeurs des



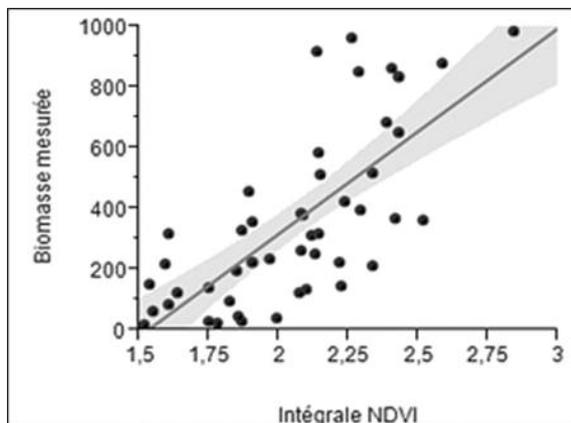
$$B_{Reel} = -854,76 + 625,64 \cdot \text{int}$$

Figure 6 : Ajustement avec l'intégrale NDVI en zone sahélienne.



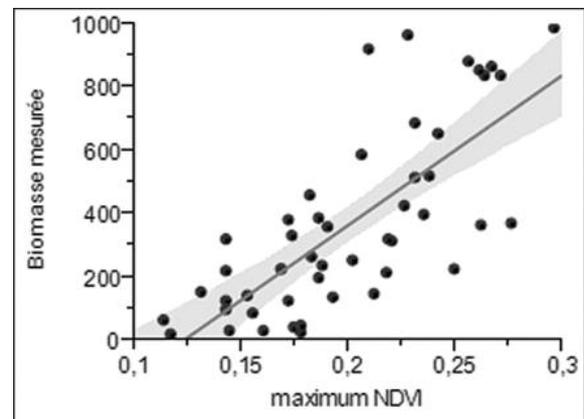
$$B_{Reel} = -783,74 + 5888,53 \cdot \text{max}$$

Figure 7 : Ajustement avec le maximum NDVI en zone sahélienne.



$$B_{Reel} = -1031,20 + 675,36 \cdot \text{int}$$

Figure 8 : Ajustement avec l'intégrale NDVI en zone saharienne.



$$B_{Reel} = -583,08 + 4727,79 \cdot \text{max}$$

Figure 9 : Ajustement avec le maximum NDVI en zone saharienne.

Zone	nord sahélienne	sahélienne	saharienne
eMODIS intégrale	0,47	0,18	0,45
eMODIS maximum	0,51	0,11	0,43
SPOTVGT intégrale	0,51	0,13	0,53
SPOTVGT maximum	0,56	0,17	0,56

Tableau 2 : Comparaison des coefficients de détermination (R^2) de la relation entre l'intégrale ou le maximum de NDVI et les biomasses totales (herbes et foliaires ligneuses), suivant les zones bioclimatiques.

Zone	nord sahélienne	sahélienne	saharienne
eMODIS intégrale	375	573	217
eMODIS maximum	361	594	220
SPOTVGT intégrale	362	591	200
SPOTVGT maximum	344	576	193

Tableau 3 : Comparaison des erreurs (RMSE en kg MS/ha) de la relation entre l'intégrale ou le maximum de NDVI de SPOT VEGETATION et de MODIS et les biomasses totales (herbes et foliaires ligneuses)

RMSE varie autour de 360 kg de MS.ha⁻¹, en zone nord-sahélienne, de 207 en zone saharienne et sont de 583 en zone sahélienne, soit des erreurs moyennes respectives de 51 %, 47 % et 57 %.

4.1.2. Analyse suivant les années

Les résultats de la régression linéaire simple entre la biomasse mesurée au sol au cours de la période

allant de 2001 à 2012 et soit l'intégrale, soit le maximum du NDVI de SPOT VEGETATION et d'eMODIS sont illustrés par les **tableaux 4 à 7** suivant les années. La régression montre partout que la relation est hautement significative et pour toutes les années ($P < .0001$). Les coefficients de détermination R^2 varient entre 38 et 72 %, la variation se faisant de façon similaire suivant le type d'indice (intégrale ou maximum) et le capteur.

Année	Modèle	R^2	RMSE (kg MS/ha)
2001	BReel = -1253,924 + 758,15*int	0,56	384
2002	BReel = -502,31 + 387,64*int	0,74	137
2003	BReel = -772,57 + 583,17*int	0,62	253
2004	BReel = -571,2492 + 435,89259*int	0,58	126
2005	BReel = -762,0385 + 561,78013*int	0,72	233
2006	BReel = -1106,661 + 710,18*int	0,63	351
2007	BReel = -343,09 + 446,17*int	0,54	233
2008	BReel = -954,22 + 528,74*int	0,52	299
2009	BReel = -566,36 + 439,49*int	0,59	162
2010	BReel = -1375,12 + 859,19*int	0,54	455
2011	BReel = -413,05 + 316,12*int	0,65	164
2012	BReel = -1000,97 + 786,70*int	0,56	410

BReel : Biomasse totale; int : intégrale NDVI

Tableau 4 : Relation entre l'intégrale de NDVI de SPOT VEGETATION et les biomasses totales (herbes et foliaires ligneuses) suivant les années.

Année	Modèle	R ²	RMSE (kg MS/ha)
2001	BReel = -651,9552 + 4835,0476*max	0,38	455
2002	BReel = -213,69 + 2405,52*max	0,65	160
2003	BReel = -1187,53 + 7636,05*max	0,76	198
2004	BReel = -224,94 + 2357,85*max	0,6	124
2005	BReel = -502,5637 + 4412,1453*max	0,63	269
2006	BReel = -663,3123 + 4871,8838*max	0,59	368
2007	BReel = 16,041177 + 2961,89*max	0,57	225
2008	BReel = -660,53 + 4278,37*max	0,54	288
2009	BReel = -335,25 + 3275,65*max	0,52	176
2010	BReel = -968,49 + 6703,91*max	0,59	433
2011	BReel = -262,61 + 2676,15*max	0,63	168
2012	BReel = -766,32 + 6197,71*max	0,6	391

BReel : Biomasse totale; max : maximum NDVI

Tableau 5 : Relation entre le maximum de NDVI de SPOT VEGETATION et les biomasses totales (herbes et foliaires ligneuses) suivant les années

Année	Modèle	R ²	RMSE
2001	BReel = -2274,409 + 563,05093*int	0,62	357
2002	BReel = -958,7376 + 271,08641*int	0,71	144
2003	BReel = -1274,074 + 392,15374*int	0,63	247
2004	BReel = -887,96 + 262,05976*int	0,54	131
2005	BReel = -1360,005 + 398,9208*int	0,73	229
2006	BReel = -1853,817 + 743,39651*in	0,62	354
2007	BReel = -685,6192 + 444,54888*int	0,56	229
2008	BReel = -1565,205 + 574,01701*int	0,53	296
2009	BReel = -1035,214 + 476,31009*int	0,57	164
2010	BReel = -2133,852 + 924,50059*int	0,52	464
2011	BReel = -769,8143 + 336,08794*int	0,64	163
2012	BReel = -1920,488 + 584,59571*int	0,59	394B

Reel : Biomasse totale; int : intégrale NDVI

Tableau 6 : Relation entre l'intégrale de NDVI de eMODIS et les biomasses totales (herbes et foliaires ligneuses) suivant les années.

La production de biomasse dans la zone pastorale du Niger est donc expliquée pour certaines années à un peu plus de 70 % par le NDVI (maximum ou intégrale) qu'il soit de SPOT VEGETATION ou d'eMODIS (**tableau 8**). Les valeurs des RMSE varient de 120 à 455 kg.MS.ha-1 M en zone Nord sahélienne (**tableau 9**). Les résultats des tests (Wilcoxon et Signes) montrent qu'il n'y a pas de

différence significative entre les RMSE (**tableaux 10 et 11**).

4.2. Discussion

La production de la carte de biomasse annuelle est réalisée à partir d'une équation de régression linéaire obtenue par la méthode des moindres

Année	Modèle	R ²	RMSE
2001	BReel = -937,3483 + 5745,7317*max	0,45	429
2002	BReel = -292,647 + 2666,006*max	0,71	145
2003	BReel = -770,2853 + 5720,8998*max	0,68	231
2004	BReel = -309,6009 + 2548,3944*max	0,62	120
2005	BReel = -478,6606 + 4132,3514*max	0,62	270
2006	BReel = -872,668 + 5573,4358*max	0,62	353
2007	BReel = 17,718957 + 3001,7481*max	0,65	204
2008	BReel = -663,4033 + 4337,4184*max	0,56	284
2009	BReel = -314,2879 + 3358,0384*max	0,49	178
2010	BReel = -1033,525 + 7201,3384*max	0,58	433
2011	BReel = -290,5028 + 2687,9264*max	0,62	169
2012	BReel = -971,6338 + 7380,0853*max	0,68	350

BReel : Biomasse totale; int : intégrale NDVI

Tableau 7: relation entre le maximum de NDVI de eMODIS et les biomasses totales (herbes et foliaires ligneuses) suivant les années.

Année	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
eMO int	0,62	0,71	0,63	0,54	0,73	0,62	0,56	0,53	0,57	0,52	0,64	0,59
eMO max	0,45	0,71	0,68	0,62	0,62	0,62	0,65	0,56	0,49	0,58	0,62	0,68
SPOT int	0,56	0,74	0,62	0,58	0,72	0,63	0,54	0,52	0,59	0,54	0,65	0,56
SPOTmax	0,38	0,65	0,76	0,60	0,63	0,59	0,57	0,54	0,52	0,59	0,63	0,60

eMODIS Intégrale ; eMO max : eMODIS maximum ; SPOT int : SPOT VEGETATION intégrale ; SPOT max : SPOT VEGETATION maximum

Tableau 8 : Comparaison inter-annuelle des coefficients de détermination (R²) entre l'intégrale ou le maximum de NDVI de SPOT VEGETATION et de MODIS et les biomasses totales (herbes et foliaires ligneuses) (Période 2001-2012)

Année	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
eMO int	357	144	247	131	229	354	229	296	164	464	163	394
eMO max	429	145	231	120	270	353	204	284	178	433	169	350
SPOT int	384	137	253	126	233	351	233	299	162	455	164	410
SPOT max	455	160	198	124	269	368	225	288	176	433	168	391

EMOint : EMODIS Intégrale ; eMO max : eMODIS maximum ; SPOT int : SPOT VEGETATION intégrale ; SPOT max : SPOT VEGETATION maximum

Tableau 9 : Variation inter-annuelle des erreurs (RMSE en kg MS/ha) de la relation entre l'intégrale ou le maximum de NDVI de SPOT VEGETATION et de MODIS et les biomasses totales (herbes et foliaires ligneuses) pour la période 2001 à 2012.

	SPOTint - SPOT max	EMOmax - SPOT max	EMOmax - SPOT int	EMOint - SPOT max	EMOint - SPOT int	EMOint - eMO max
Statistique de test S	-5,000	-17,000	-5,000	-7,000	-7,500	6,500
Prob > S	0,7334	0,1426	0,7178	0,6221	0,5830	0,6353
Prob >S	0,6333	0,9287	0,6411	0,6890	0,7085	0,3176
Prob <	0,3667	0,0713	0,3589	0,3110	0,2915	0,6824

eMOint : eMODIS Intégrale ; eMOmax : eMODIS maximum ; SPOTint : SPOT VEGETATION intégrale ; SPOTmax : SPOT VEGETATION maximum

Tableau 10 : Test de Wilcoxon (basé sur les rangs).

	SPOTint - SPOTmax	EMOmax - SPOTmax	EMOmax - SPOTint	EMOint - SPOTmax	Emoint - SPOTint	EMOint - eMOmax
Statistique de test M	0,000	-1,500	0,000	0,000	-1,000	1,000
Prob ≥ M	1,0000	0,5488	1,0000	1,0000	0,7744	0,7744
Prob ≥ M	0,5002	0,8867	0,5002	0,5002	0,8062	0,3872
Prob ≤ M	0,5000	0,2744	0,5000	0,5000	0,3872	0,8062

eMO int : eMODIS Intégrale ; eMO max : eMODIS maximum ; SPOTint : SPOT VEGETATION intégrale ; SPOTmax : SPOT VEGETATION maximum

Tableau 11 : Test des signes.

carrés entre l'intégrale du NDVI ou le maximum du NDVI et les données de biomasse mesurées *in situ*. Cette approche a été l'objet de plusieurs travaux (Tucker et al., 2005, Maselli et al., 2000, Wylie et al., 1991, Diallo et al., 1991). En revanche, à notre connaissance, dans la zone d'études, c'est la première fois que ce type d'analyse couvre un aussi longue période (12 ans) offrant ainsi la possibilité d'examiner le comportement du modèle dans le temps et l'espace. La zone pastorale du Niger couvre une superficie de 252 000 km², la surface totale des échantillons utilisés pour les relevés au sol dans le cadre des campagnes d'évaluation de la biomasse varie de 150 à 450 km² suivant les années. Or la surface totale des échantillons des premières études faites sur un terrain moins large (l'Est et le centre du pays) ont varié entre 25 et 100 km². En effet, elles ne prenaient pas en compte toute la diversité spatiale des écosystèmes pâturés. On note globalement que les coefficients de détermination pour les années 1986, 1987 et 1988 obtenus par Wylie et al. (1991) sont légèrement supérieurs (respectivement 0,68, 0,91 et 0,73), mais varient significativement d'une année à l'autre. Cela est aussi vrai pour les années concernées par notre étude avec une erreur standard de + ou - 200 kg.ha⁻¹. Au Sénégal, une étude similaire conduite par Diallo et al. (1991) avec des données

NOAA AVHRR pour les années 1987 et 1988 donnait des coefficients de détermination similaires à ceux du Niger. Les coefficients de détermination varient suivant les années et les zones dans toutes les études. On observe que nos résultats sont légèrement inférieurs à ceux trouvés précédemment au Niger et au Sénégal. D'une part, cette différence peut s'expliquer en partie par le fait que Wylie et al (1991) et Diallo et al (1991) ont utilisé les images NDVI provenant de NOAA AVHRR alors que nous avons utilisé des images issues des capteurs VEGETATION du satellite SPOT et celles de MODIS TERRA lissées en eMODIS. D'autre part, elle pourrait s'expliquer par les conditions de relevé de la végétation (difficulté de respecter rigoureusement les exigences de la méthode). Un examen des erreurs (en relatif) montre qu'on se trompe pratiquement en majorant ou en minorant de moitié la productivité de biomasse fourragère. Le RMSE moyen est d'environ 360,5 kg.ha⁻¹, si on rapporte cette erreur à la superficie totale de la zone pastorale (252 207,5 km²) on trouve une erreur moyenne annuelle de 9 092 080 tonnes, soit environ l'alimentation de 5 387 899 UBT pour 9 mois (saison sèche). Au regard du niveau élevé de l'erreur, il est alors nécessaire d'explorer d'autres pistes d'amélioration du modèle actuel. L'utilisation de l'intégrale ou le maximum NDVI

seul nous paraît limitative, car des études menées ont montré qu'on peut assurer le suivi de la phénologie de la végétation à travers plusieurs paramètres. On peut par exemple explorer l'utilisation des métriques dérivées des séries d'images (Jönsson et Eklundh, 2004). On peut aussi envisager de combiner les indices de satisfaction des besoins en eau pendant les différents stades phénologiques de la végétation. Les résultats de la comparaison inter senseurs de l'étude ont montré que pour l'estimation de la biomasse, il n'y a pas de différence à utiliser les NDVI de SPOT VEGETATION ou d'eMODIS. L'intégrale et le maximum du NDVI ne présentent pas de différence significative, ce qui signifie que l'opérateur peut utiliser l'un ou l'autre de ces deux indices. Ceci confirme l'étude de comparaison entre NOAA AVHRR, MODIS et SPOT VEGETATION réalisée (Tucker et al., 2005). Cette étude montrait qu'il y a une similarité entre les trois capteurs pour la dynamique de la végétation.

5. CONCLUSION

Les résultats ont montré que le modèle fluctue d'une année à l'autre comme l'atteste les R^2 qui varient suivant les années entre 0,52 et 0,73 mais, les corrélations restent très significatives ($P < 0,0001$). Aussi, il ressort que le coefficient de détermination est plus élevé dans les zones saharienne et nord sahélienne que dans la zone sahélienne typique. Les erreurs quadratiques moyennes (RMSE) sont quand même élevées, elles varient selon les années entre 120 et 460 Kg MS/ha. Les tests non paramétriques de comparaison de moyenne (Test de Wilcoxon et des signes) ont montré qu'il n'y a pas de différence significative à utiliser SPOT VEGETATION ou eMODIS (intégrale ou maximum). Cette possibilité d'intercomparabilité permet aux utilisateurs d'assurer la production de produits sans interruption avec une possibilité d'analyse convergente. Néanmoins, le modèle nécessite des améliorations importantes car l'erreur moyenne est de 52 %.

6. REMERCIEMENTS

Nous adressons nos sincères remerciements aux responsables du Projet AGRICAB (developing increased EO capacity for better agriculture and forestry management in Africa) qui ont bien voulu financer les travaux de ma thèse dont cet article constitue une partie des résultats. Nous adressons également toute notre reconnaissance aux autorités administratives du Centre régional AGRHYMET (CRA) pour leur soutien et à Monsieur Fodé CAMARA SANOUSSI, Directeur du Développement Pastorale du Niger (DDPN) pour la

mise à notre disposition de la base de données du Ministère de l'Elevage et des Industrie Animales.

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGRHYMET. (2002). *Atlas agro climatique du Niger, n° 240, Centre Régional AGRHYMET (CRA), Niamey, NIGER, 136 pages.*
- BECK P. S. A., P. JÖNSSON, K. A. HØGDA, S. R. KARLSEN, L. EKLUNDH et A. K. SKIDMORE. (2007). A ground-validated NDVI dataset for monitoring vegetation dynamics and mapping phenology in Fennoscandia and the Kola peninsula. *International Journal of Remote Sensing*, 28(19), 4311-4330. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160701241936>
- BOZZINI C. et F. MASELLI. (2002). Analysis of Multitemporal NDVI Data for Crop Yield Forecasting in the Sahel. *GeoCarto International*, 17(1), 53-60. <http://dx.doi.org/10.1080/10106040208542225>
- BUTT B., M. D. TURNER, A. SINGH et L. BROTTM. (2011). Use of MODIS NDVI to evaluate changing latitudinal gradients of rangeland phenology in Sudano-Sahelian West Africa. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3367-3376. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425711002732>
- DIALLO O., A. DIOUF, N. P. HANAN, A. NDIAYE et Y. PREVOST. (1991). AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa: 1987-1988. *International Journal of Remote Sensing*, 12(6), 1259-1279. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169108929725>
- DIALLO O., A. DIOUF, N. P. HANAN, A. NDIAYE et Y. PRÉVOST. (1991). AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa: 1987-1988. *International Journal of Remote Sensing*, 12(6), 1259-1279. <http://dx.doi.org/10.1080/01431169108929725> <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169108929725>
- FAO. (1981). *Manuel d'inventaire forestier. n° 27, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome, Italie, 194 pages, http://www.fao.org/docrep/016/ap358f/ap358f00.pdf*
- FONTANA D. C., A. B. POTGIETER et A. APAN. (2007). Assessing the relationship between shire winter crop yield and seasonal variability of the MODIS NDVI and EVI images. *Applied GIS*, 3(7), 1-16. <http://eprints.usq.edu.au/8120>
- GASTON A., K. DIEYE, J. C. BERGÈS et J. CITEAU. (1987). Évaluation de la productivité primaire

- herbacée annuelle au Sahel sénégalais: saison des pluies 1986. *Veille Climatique Satellitaire*(17), 49-54.
<http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:24121>
- GROTEN S. M. E. (1993). NDVI—crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso. *Title REMOTE SENSING*, 14(8), 1495-1515.
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169308953983>
- HIERNAUX P. et H. N. LE HOUÉROU. (2006). Les parcours du Sahel. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 17(1), 51-71.
http://www.jle.com/fr/revues/agro_biotech/agr/e-docs/00/04/1F/07/resume.phtml
- HIERNAUX P. H. Y. et C. O. Justice. (1986). Suivi du développement végétal au cours de l'été 1984 dans le Sahel Malien. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1515-1531.
<http://dx.doi.org/10.1080/01431168608948951>
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431168608948951>
- HMIMINA G., E. DUFRÈNE, J. Y. PONTAILLER, N. DELPIERRE, M. AUBINET, B. CAQUET, A. DE GRANDCOURT, B. BURBAN, C. FLECHARD, A. GRANIER, P. GROSS, B. HEINESCH, B. LONGDOZ, C. MOUREAUX, J. M. OURCIVAL, S. RAMBAL, L. SAINT ANDRÉ et K. SOUDANI. (2013). Évaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements. *Remote Sensing of Environment*, 132(0), 145-158. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425713000229>
- HOLBEN B. et R. S. FRASER. (1984). Red and near-infrared sensor response to off-nadir viewing. *International Journal of Remote Sensing*, 5(1), 145-160. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431168408948795>
- HOLBEN B., D. KIMES et R. S. FRASER. (1986). Directional reflectance response in AVHRR red and near-IR bands for three cover types and varying atmospheric conditions. *Remote Sensing of Environment*, 19(3), 213-236.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425786900544>
- HUETE A., K. DIDAN, T. MIURA, E. P. RODRIGUEZ, X. GAO et L. G. FERREIRA. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1), 195-213.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425702000962>
- IEMVT et CTA. (1987). *Élevage et potentialités pastorales sahéliennes. Synthèses cartographiques, Niger*, CTAetIEMVT-CIRAD (Eds.), 32 pages.
- JÖNSSON P. et L. EKLUNDH. (2004). TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 30(8), 833-845. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300404000974>
- JUSTICE C. O., B. N. HOLBEN et M. D. GWYNNE. (1986). Monitoring East African vegetation using AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1453-1474.
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431168608948948>
- KASTENS J. H., T. L. KASTENS, D. L. A. KASTENS, K. P. PRICE, E. A. MARTINKO et R.-Y. LEE. (2005). Image masking for crop yield forecasting using AVHRR NDVI time series imagery. *Remote Sensing of Environment*, 99(3), 341-356.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425705003056>
- LÜDEKE M. K. B., P. H. RAMAGE et G. H. KOHLMAIER. (1996). The use of satellite NDVI data for the validation of global vegetation phenology models: application to the Frankfurt Biosphere Model. *Ecological Modelling*, 91(1), 255-270. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380095001921>
- MASELLI F., C. CONESE, L. PETKOV et M. A. GILABERT. (1993). Environmental monitoring and crop forecasting in the Sahel through the use of NOAA NDVI data. A case study: Niger 1986–89. *International Journal of Remote Sensing*, 14(18), 3471-3487. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169308904458>
- MASELLI F., S. ROMANELLI, L. BOTTAI et G. MARACCHI. (2000). Processing of GAC NDVI data for yield forecasting in the Sahelian region. *International Journal of Remote Sensing*, 21(18), 3509-3523. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/014311600750037525>
- MEIA. (1990). *Manuel réduit d'évaluation des pâturages par la technique du double échantillonnage Ministère d'Élevage et des Industries Animales (MEIA), Niamey, Niger, 6 pages.*
- MEIA. (2012). *Rapport d'activité de l'année 2012. Ministère d'Élevage et des Industries Animales (MEIA), Niamey, NIGER, 82 pages.*
- MKHABELA M. S., P. BULLOCK, S. RAJ, S. WANG et Y. YANG. (2011). Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(3), 385-393. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192310003138>
- POTDAR M. B., K. R. MANJUNATH et N. L. PUROHIT. (1999). Multi-season atmospheric normalization of NOAA AVHRR derived NDVI for crop yield modeling. *Geocarto International*, 14(4), 52-57.

- <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10106049908542128>
- RASMUSSEN M. S. (1998). Developing simple, operational, consistent NDVI-vegetation models by applying environmental and climatic information. Part II: Crop yield assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 19(1), 119-139. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/014311698216468>
- ROUSE J. W., R. H. HAAS, D. W. DEERING, J. A. SCHELL et J. C. HARLAN. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. 1. http://www.researchgate.net/publication/246866091_Monitoring_Vegetation_Systems_in_the_Great_Plains_with_ERTS
- SIVAKUMAR M. V. K., A. MAIDOUKIA et R. D. STERN. (1993). agroclimatologie de l'afrique de l'ouest NIGER. *bulletin d'information N°5*. Retrieved from https://library.wur.nl/isric/fulltext/isricu_i12057_001.pdf
- SOUDANI K., G. HMIMINA, N. DELPIERRE, J. Y. PONTAILLER, M. AUBINET, D. BONAL, B. CAQUET, A. DE GRANDCOURT, B. BURBAN, C. FLECHARD, D. GUYON, A. GRANIER, P. GROSS, B. HEINESH, B. LONGDOZ, D. LOUSTAU, C. MOUREAUX, J. M. OURCIVAL, S. RAMBAL, L. SAINT ANDRÉ et E. DUFRÉNE. (2012). Ground-based Network of NDVI measurements for tracking temporal dynamics of canopy structure and vegetation phenology in different biomes. *Remote Sensing of Environment*, 123(0), 234-245. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425712001319>
- SWETS D. L., B. C. REED et J. D. ROWLAND. (1999). A weighted leastsquares approach to temporal smoothing of NDVI. 526–536. <http://phenology.cr.usgs.gov/pubs/ASPRS%20Swets%20et%20al%20Smoothing.pdf>
- TUCKER C. J., B. N. HOLBEN, J. H. ELGIN JR et J. E. McMURTREY III. (1981). Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, 11(0), 171-189. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425781900183>
- TUCKER C. J., C. O. JUSTICE et S. D. PRINCE. (1986). Monitoring the grasslands of the Sahel 1984–1985. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1571-1581. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431168608948954>
- TUCKER C. J., J. E. PINZON, M. E. BROWN, D. A. SLAYBACK, E. W. PAK, R. MAHONEY, E. F. VERMOTE et N. EL SALEOUS. (2005). An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(20), 4485-4498. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160500168686>
- TUCKER C. J., C. L. VANPRAET, M. J. SHARMAN et G. VAN ITTERSUM. (1985). Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel: 1980–1984. *Remote Sensing of Environment*, 17(3), 233-249. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425785900975>
- WAGENSEIL H. et C. SAMIMI. (2006). Assessing spatio-temporal variations in plant phenology using Fourier analysis on NDVI time series: results from a dry savannah environment in Namibia. *International Journal of Remote Sensing*, 27(16), 3455-3471. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160600639743> <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160600639743>
- WITTEMYER G., H. BARNER RASMUSSEN et I. DOUGLAS-HAMILTON. (2007). Breeding phenology in relation to NDVI variability in free-ranging African elephant. *Ecography*, 30(1), 42-50. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.0906-7590.2007.04900.x/full>
- WYLIE B. K., J. A. HARRINGTON, S. D. PRINCE et I. DENDA. (1991). Satellite and ground-based pasture production assessment in Niger: 1986–1988. *International Journal of Remote Sensing*, 12(6), 1281-1300. <http://dx.doi.org/10.1080/01431169108929726> <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169108929726>
- WYLIE B. K., J. A. HARRINGTON JR, S. D. PRINCE et I. DENDA. (1991). Satellite and ground-based pasture production assessment in Niger: 1986–1988. *International Journal of Remote Sensing*, 12(6), 1281-1300. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169108929726>

LISTE DES TABLEAUX, FIGURES ET PLANCHES

Tableaux

Tableau 1 : Comparaison des coefficients de détermination globaux (R^2) de la relation entre l'intégrale ou le maximum de NDVI de SPOT VEGETATION et de eMODIS et les biomasses totales (herbes et foliaires ligneuses).

Tableau 2 : Comparaison des coefficients de détermination (R^2) de la relation entre l'intégrale ou le maximum de NDVI et les biomasses totales (herbes et foliaires ligneuses), suivant les zones bioclimatiques.

Tableau 3 : Comparaison des erreurs (RMSE en kg MS/ha) de la relation entre l'intégrale ou le maximum de NDVI de SPOT VEGETATION et de MODIS et les biomasses totales (herbes et foliaires ligneuses).

Tableau 4 : Relation entre l'intégrale de NDVI de SPOT VEGETATION et les biomasses totales (herbes et foliaires ligneuses) suivant les années.

Tableau 5: Relation entre le maximum de NDVI de SPOT VEGETATION et les biomasses totales (herbes et foliaires ligneuses) suivant les années.

Tableau 6 : Relation entre l'intégrale de NDVI de eMODIS et les biomasses totales (herbes et foliaires ligneuses) suivant les années.

Tableau 7: relation entre le maximum de NDVI de eMODIS et les biomasses totales (herbes et foliaires ligneuses) suivant les années.

Tableau 8 : Comparaison inter-annuelle des coefficients de détermination (R^2) entre l'intégrale ou le maximum de NDVI de SPOT VEGETATION et de MODIS et les biomasses totales (herbes et foliaires ligneuses (Période 2001-2012).

Tableau 9 : Variation inter-annuelle des erreurs (RMSE en kg MS/ha) de la relation entre l'intégrale ou le maximum de NDVI de SPOT VEGETATION et de MODIS et les biomasses totales (herbes et foliaires ligneuses) pour la période 2001 à 2012.

Tableau 10 : Test de Wilcoxon (basé sur les rangs).

Tableau 11 : Test des signes.

Figures

Figure 1 : Modèle schématique du traitement.

Figure 2 : Ajustement avec l'intégrale NDVI à l'échelle globale.

Figure 3 : Ajustement avec le maximum NDVI à l'échelle globale.

Figure 4 : Ajustement avec l'intégrale NDVI en zone nord sahélienne.

Figure 5 : Ajustement avec le maximum NDVI en zone nord sahélienne.

Figure 6 : Ajustement avec l'intégrale NDVI en zone sahélienne.

Figure 7 : Ajustement avec le maximum NDVI en zone sahélienne.

Figure 8 : Ajustement avec l'intégrale NDVI en zone saharienne.

Figure 9 : Ajustement avec le maximum NDVI en zone saharienne.

Planches

Planche 1 : Présentation de la zone d'étude.

Planche 2 : Extraction du NDVI par site.

EVALUATION OF PASTORAL RESOURCES IN NIGERIAN SAHEL USING NDVI DATA FROM SPOT-VEGETATION AND MODIS

Issa GARBA¹, Bakary DJABY², Illa SALIFOU³, Amadou BOUREIMA⁴, Ibra TOURE⁵, Bernard TYCHON⁶

1 Doctorant à l'Université de Liège (ULg) ; Expert en agro pastoralisme au Centre Régional AGRHYMET (CRA), BP : 11011 Niamey Niger, téléphone +227 90682639,

E-mail : Is.garba@gmail.com ou g.issa@agrhytmet.ne

2 Chercheur associé à Université de Liège (ULg), téléphone : +32497323482,

email : bakary.djaby@gmail.com ou b.djaby@ulg.ac.be

3 Chercheur à l'Institut des Radio-Isotopes de Niamey (IRI), Université Abdou Mounouni,

BP : 1727 Niamey NIGER

e-mail : isalifou@yahoo.fr

4 Chef de la Division pastorale au ministère de l'Élevage et des Industries Animales

e-mail : aboreimas@yahoo.fr

5 Chercheur au Centre de coopération internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Ouagadougou BURKINA FASO

email : ibra.toure@cirad.fr

6 Chargé de cours à l'Université de Liège (ULg), Faculté des sciences et gestion de l'environnement,

email : Bernard.Tychon@ulg.ac.be

ABSTRACT

This study was done in the pastoral zone of Niger. The objectives are to: test the stability of estimating biomass MEIA model, compare the performance of the full and maximum NDVI SPOT VEGETATION and eMODIS by using field data collected from 2001 to 2012 by the Ministry of Livestock and Animal Industries (MEIA) of Niger. We used simple linear regression method to calculate the coefficients of determination and root mean square errors on all the series, by bioclimatic zone and then year by year. The results showed that R^2 varies depending on the year between 0.52 and 0.73 ($p < .0001$), the coefficient of determination is higher in the northern Sahelian and Saharan zones than in the typical Sahelian zone. The annual RMSE vary between 120 and 460 kg DM / ha. Nonparametric tests comparing average (Wilcoxon and signs) have shown that there is no significant difference to use SPOT VEGETATION or eMODIS (full or maximum). This intercomparability of earth observation data is a way to insure products without interruption and with the capability for users to use one source of data or the other without risk of information loss.

KEYWORDS

NDVI, SPOT VEGETATION, eMODIS, BIOMASS, MEIA

LIST OF TABLES, FIGURES AND PLATES

Tables

Table 1: Comparison of the total coefficients of determination (R^2) of the relationship between the integral or maximum NDVI SPOT VEGETATION and eMODIS and total biomass (grasses and woody foliage).

Table 2: Comparison of coefficients of determination (R^2) of the relationship between the integral or maximum NDVI and total biomass (grasses and woody foliar), according to bioclimatic zones.

Table 3: Comparison of Errors (RMSE in kg DM/ha) of the relationship between the integral or maximum NDVI SPOT VEGETATION and MODIS and total biomass (grasses and woody foliar), according to bioclimatic zones.

Table 4: The relationship between the integral of NDVI SPOT VEGETATION and total biomass (leaf weeds and woody) following years.

Table 5: Relationship between the maximum NDVI of SPOT VEGETATION and total biomass (woody herbs and leaf) following years.

Table 6: The relationship between the integral of NDVI eMODIS and total biomass (leaf weeds and woody) following years.

Table 7: Relationship between the maximum NDVI of eMODIS and total biomass (woody herbs and leaf) following years.

Table 8: Inter-annual variation of coefficients of determination (R²) between the integral or maximum NDVI SPOT VEGETATION and MODIS and total biomass (grasses and woody foliar (2001 to 2012 period).

Table 9: Inter-annual variation of error (RMSE in kg DM/ha) of the relationship between the integral or maximum NDVI SPOT VEGETATION and MODIS and total biomass (grasses and woody foliage) for the Period 2001 to 2012.

Table 10 : Wilcoxon test (based on ranks).

Table 11: Signs test.

Figures

Figure 1: Schematic diagram of data processing.

Figure 2: Fit with the integral NDVI globally.

Figure 3: Fit with maximum NDVI globally.

Figure 4: Fit with the integral NDVI in northern Sahel.

Figure 5: Fit with the maximum NDVI in northern Sahel.

Figure 6: Fit with the integral NDVI in the Sahel.

Figure 7: Fit with the maximum NDVI in the Sahel.

Figure 8: Fit with the integral NDVI Saharan zone.

Figure 9: Fit with the maximum NDVI in the Saharan zone.

Plates

Plate 1 : Location of study area.

Plate 2 : Illustration of NDVI extraction around a test site.