

Estimation des rendements fourragers des pâturages dans les espaces climatiques du Burkina Faso à partir de données satellitaires

Wièmè Some^{1,2,4} Antoine Denis^{2*} Amani Louis Kouadio³
Bakary Djaby² Hassan Bismark Nacro⁴
Adrien Marie Gaston Belem⁴ Bernard Tychon²

Mots-clés

Pâturages, rendement fourrager, biomasse aérienne, zone agroclimatique, imagerie par satellite, modèle linéaire, Burkina Faso

© W. Some et al., 2024



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Submitted: 8 October 2022

Accepted: 16 April 2024

Online: 14 June 2024

DOI: 10.19182/remvt.37009

Résumé

L'évaluation des ressources fourragères est un élément clé de la gouvernance des crises alimentaires du bétail au Burkina Faso. Cette étude visait l'évaluation, pour la première fois, de la possibilité d'estimer les rendements fourragers des pâturages dans les espaces climatiques du Burkina Faso via l'utilisation de modèles statistiques linéaires uni et multivariés construits à partir de données de biomasse végétale fourragère collectées sur le terrain en 2017, 2018 et 2019, de variables satellitaires phénologiques (indice de végétation de la différence normalisée [NDVI] et fraction de rayonnement photosynthétiquement actif absorbé [FAPAR]) et agroclimatiques (précipitations, humidité du sol, évapotranspiration, température de surface). Une recherche exhaustive des meilleurs modèles statistiques linéaires comportant une à quatre variables a été réalisée et les meilleurs modèles selon le critère d'information bayésien (BIC) identifiés. La performance des modèles uni à quadrivariés obtenus s'est avérée assez faible avec, pour l'ensemble des espaces climatiques excepté l'espace sahélien, des RRMSE press variant de 55 % à 61 % (R^2 press de 0,07 à 0,36), et pour l'espace climatique sahélien des RRMSE press variant de 42 % à 49 % (R^2 press de 0,59 à 0,69). La baisse de corrélation de la majorité des variables avec la biomasse végétale fourragère selon le gradient nord-sud résulte en une baisse de performance des modèles selon ce gradient. Les variables agroclimatiques se sont révélées inutiles, et celles issues du FAPAR sont globalement plus performantes que celles issues du NDVI. Une très faible plus-value des modèles multivariés comparés aux modèles univariés a été observée, excepté pour l'espace sahélien. Les modèles développés sur des espaces climatiques plus homogènes se sont montrés plus performants. Une série de recommandations a été identifiée pour améliorer le couplage entre données de biomasse végétale fourragère collectées sur le terrain et variables extraites des images satellitaires, et ainsi améliorer la performance des modèles.

■ Comment citer cet article : Some W., Denis A., Kouadio A.L., Djaby B., Nacro H.B., Belem A.M.G., Tychon B., 2024. Estimation des rendements fourragers des pâturages dans les espaces climatiques du Burkina Faso à partir de données satellitaires. *Rev. Elev. Med. Vet. Pays Trop.*, 77: 37009, doi: 10.19182/remvt.37009

■ INTRODUCTION

L'élevage constitue un pilier important de l'économie et du bien-être des ménages ruraux dans les pays du Sahel (Nkonya et al., 2015 ; Valerio et al., 2020). Au Burkina Faso, il constitue la première source de revenus monétaires des ménages ruraux et leur permet, ainsi, d'accéder aux services sociaux de base (INSD, 2007). La pratique de l'activité d'élevage est un moyen de lutte contre la pauvreté et le chômage des jeunes en milieu rural (Gning, 2005 ; Johnson et al., 2015). L'État burkinabè élabore annuellement depuis 2018 un plan de réponse et de soutien aux éleveurs vulnérables (PRSEV) qui vise à mobiliser des ressources financières pour soutenir les ménages pauvres pratiquant l'élevage. Celui-ci permet de planifier annuellement des actions

1. Ministère des Ressources Animales & Halieutiques, Secrétariat Permanent en charge de la gestion des Crises et Vulnérabilités en Élevage, Ouagadougou, Burkina Faso

2. Université de Liège (ULiège), UR SPHERES, Faculté des Sciences, Campus d'Arlon, Département des Sciences et Gestion de l'environnement, Equipe Eau-Environnement-Développement, Arlon, Belgique

3. University of Southern Queensland, Centre for Applied Climate Sciences, Toowoomba, Australie

4. Université Nazi Boni, Institut du Développement Rural, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

* Auteur pour la correspondance

Tél : +32 63 230 997 ; email : Antoine.Denis@uliege.be

en lien avec la gestion des risques majeurs concernant les animaux d'élevage. La contingence de la sécheresse agropastorale est l'un des piliers les plus importants de ce plan (MRAH, 2020). Dans cet outil financier et de plaidoyer, le coût de l'alimentation du cheptel est le poste de dépense le plus important. Il représente plus de 50 % à 60 % du budget total du plan. Ce poste de dépense varie en fonction de la performance de la campagne agropastorale (à savoir le niveau de développement de la végétation et le remplissage des points et plans d'eau de surface) qui influence l'effectif d'animaux exposés aux crises alimentaires. Le coût de l'alimentation du bétail est globalement estimé à partir du bilan fourrager dont une phase clé est l'évaluation des pâturages (FAO, 2020). C'est au regard de cette importance de l'évaluation des ressources fourragères pour l'élaboration du PRSEV et la gouvernance des crises pastorales, que certains pays du Sahel ont convenu d'harmoniser les méthodes et les techniques d'évaluation des rendements fourragers des pâturages (PRAPS, 2017 ; PREGEC, 2019). À terme, les résultats du bilan fourrager devraient être inclus dans les analyses menées au sein du cadre harmonisé.

Les produits et services de la télédétection peuvent contribuer à l'amélioration de la mise en œuvre des politiques publiques agricoles en Afrique et, plus particulièrement, à la prévention et à la gestion des crises pastorales (Bégué et al., 2020 ; Taugourdeau et al., 2023). De nos jours, avec l'avancée technologique, de nombreux produits et données issus de l'imagerie satellitaire sont disponibles en libre accès comme les produits de Copernicus (<https://land.copernicus.eu>) ou du Early Warning and Environmental Monitoring Program de l'US Geological Survey (<https://earlywarning.usgs.gov>). Les algorithmes se perfectionnent et la qualité des images s'améliore (Khamala, 2017). Les données et produits satellitaires utilisés pour le suivi-évaluation de la campagne agropastorale sont multiples et variés (Fritz et al., 2019). Les plus couramment utilisés portent sur les pluies, l'humidité du sol, la température de surface, l'évapotranspiration et le développement de la végétation (Adole et al., 2016 ; Fritz et al., 2019), comme, par exemple, l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index), la fraction absorbée du rayonnement photosynthétiquement actif (FAPAR, Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) et la productivité de la matière sèche (DMP, dry matter productivity) (PRAPS, 2017). Ces derniers sont couramment utilisés pour l'estimation des rendements fourragers au Sahel (Diouf et al., 2015 ; Lo et al., 2022 ; Taugourdeau et al., 2023), ou pour l'estimation des rendements d'autres cultures dans des contextes géographiques différents (Thao et al., 2022). Plus particulièrement, selon différents auteurs (Meroni et al., 2014 ; Diouf et al., 2015 ; Olsen et al., 2015 ; Tian et al., 2016 ; Garba et al., 2017 ; Lo et al., 2022), l'utilisation des variables phénologiques dérivées des images satellitaires NDVI et FAPAR a conduit à des gains de précisions des modèles d'estimations des rendements fourragers. Les produits satellitaires permettent d'une part d'identifier les zones de déficit fourrager et de mieux comprendre l'espace d'occupation de l'aléa sécheresse et, d'autre part, de mieux estimer les quantités de matière sèche potentiellement disponible pour l'alimentation du bétail en période sèche. Parmi les produits satellitaires disponibles, il conviendrait d'identifier ceux qui permettent d'estimer avec une bonne fiabilité les rendements fourragers des parcours sahéliers.

Au Burkina Faso, il n'existe pas, à ce jour, de travaux d'envergure nationale sur le couplage de données de biomasse végétale fourragère collectées sur le terrain avec des variables satellitaires. Cependant, cette expérience est menée au Sénégal depuis plus de trois décennies pour accompagner l'élevage pastoral (Diouf et al., 2015). Cela est dû au fait qu'au Burkina Faso le dispositif national de collecte de biomasse végétale fourragère a été mis en place en 2017 et est toujours à ce jour dans une phase d'implémentation des sites d'observation sur le terrain. Cette activité nécessite en outre un appui technique efficient pour améliorer les méthodes d'estimation des rendements fourragers.

Dans ce contexte, cette étude a eu pour objectif d'évaluer, pour la première fois, la possibilité d'estimer les rendements fourragers des pâturages dans les espaces climatiques du Burkina Faso via l'utilisation de modèles statistiques linéaires uni et multivariés construits à partir de données de biomasse végétale fourragère collectée sur le terrain en 2017, 2018 et 2019, ainsi que de variables satellitaires phénologiques (NDVI et FAPAR) et agroclimatiques (précipitations, humidité du sol, évapotranspiration, température de surface).

■ MATERIEL ET METHODES

Le schéma méthodologique global de la recherche des meilleurs modèles statistiques d'estimation des rendements fourragers des pâturages dans les espaces climatiques du Burkina Faso à partir de données satellitaires est présenté dans la figure 1.

Espaces climatiques du Burkina Faso

Le Burkina Faso est un pays sahélier traversé par deux grandes bandes climatiques, la bande sahélienne et la bande soudanienne, selon la classification de Köppen-Geiger (Richter, 2016). La bande soudanienne est divisée en deux zones, ce qui permet de distinguer trois espaces climatiques : sahélier, nord-soudanien et sud-soudanien. Cette étude a également considéré, en plus de ces trois espaces climatiques, le regroupement des espaces climatiques sahélier et nord-soudanien, le regroupement des espaces climatiques sud-soudanien et nord-soudanien, et enfin le regroupement des trois espaces climatiques initiaux en un espace climatique national, soit un total de six espaces climatiques analysés.

L'aléa de sécheresse écologique peut toucher de manière hétérogène les différents espaces climatiques et donc impacter différenciellement leur production fourragère. Dans les zones de pâturage sahéliennes du Sénégal et du Niger, divers auteurs (Diouf et al., 2015 ; Garba et al., 2017) ont montré une réduction des erreurs des modèles d'estimation des rendements fourragers lorsque ceux-ci étaient élaborés par zone de végétation plus homogène ou zone bioclimatique, montrant ainsi l'intérêt de travailler à l'échelle d'espaces climatiques bien circonscrits et sous-nationaux. Ainsi, dans le cadre de cette étude, le découpage du territoire burkinabè en espaces climatiques a été préféré à celui en écorégions. En effet, le découpage du paysage burkinabè en écorégions, qui sont considérées comme des zones écologiques relativement homogènes (Tappan et al., 2016), ne suit pas la logique des bandes de végétation ou des zones phytogéographiques indiquées dans les travaux de Fontes et Guinko (1995). En effet, les critères géographiques utilisés pour identifier les écorégions du Burkina Faso sont basés sur l'interaction et l'intégration de nombreux facteurs biophysiques, tels que la géologie, la géomorphologie, la pédologie, l'hydrologie, la végétation, le climat, et la faune, mais aussi de facteurs anthropiques, tels que l'utilisation des terres par l'homme (Tappan et al., 2016). Ainsi, afin de travailler sur des zones de végétation plus homogènes, les écorégions ont été jugées moins pertinentes que les espaces climatiques.

La situation pluviométrique du Burkina Faso sur la période 2017-2019 est caractérisée par des cumuls de précipitations (de début avril à fin octobre) similaires à excédentaires à la normale de 1981-2010 sur une grande partie du territoire (figure 2). Malgré cette situation globalement plutôt favorable, l'hétérogénéité spatio-temporelle des pluies reste forte et certaines provinces montrent un faible niveau de développement des pâturages, ce qui peut aggraver localement le déficit fourrager. Ceci souligne l'intérêt d'évaluer, spatialement, les rendements fourragers des pâturages en fin de saison pluvieuse, en vue de faciliter la planification d'actions publiques soutenant le domaine de l'élevage.

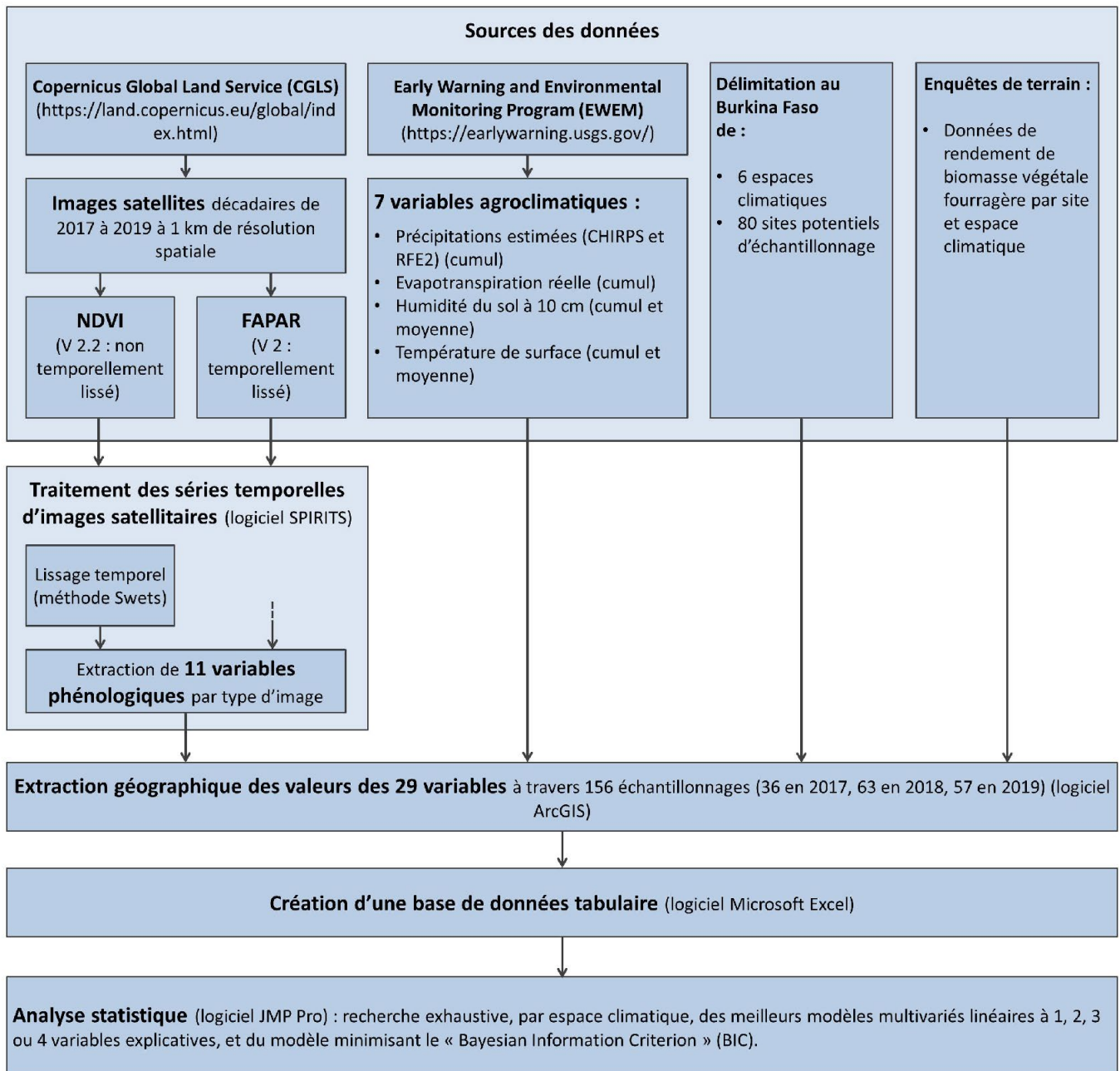


Figure 1 : Schéma méthodologique global de la recherche des meilleurs modèles statistiques linéaires d'estimation des rendements fourragers des pâturages dans les espaces climatiques du Burkina Faso à partir de données satellitaires // Overall methodological scheme for the search for the best linear statistical models for estimating forage yields in Burkina Faso's climatic zones using satellite data

Le climat et les activités anthropiques sont les deux principaux facteurs contrôlant la dynamique de la végétation (Leroux et al., 2017). La réponse spectrale de la végétation à la pluviométrie dans un espace climatique donné dépend également de sa composition floristique et de l'état de la fertilité des terres (Lind et Fensholt, 1999 ; Musau et al., 2018). La végétation burkinabè en période d'hivernage (mai-juin à septembre-octobre) se compose de ligneux et d'herbacés avec une tendance à la domination des plantes cultivées. Le début de la campagne agropastorale varie selon l'année et le gradient climatique. La période d'installation du tapis herbacé permet l'alimentation du bétail et marque la fin de la période de soudure pastorale.

L'expansion des terres agricoles est un phénomène qui impacte les unités écologiques de savanes au Burkina Faso. Le taux annuel de nouvelles parcelles défrichées est de 4,2 % (MAH et al. 2011). Sur la période de 2001 à 2014, la superficie des terres agricoles en culture

pluviale est passée de 60 441 à 114 994 km², soit une augmentation de +90 % (Knauer et al., 2017). Sur la même période, les superficies des terres irriguées ont évolué de 78 à 345 km² (+344 %), et celles des plantations ont connu un taux d'expansion de 561 à 1 568 km² (+179 %). Au Burkina Faso, la densité de la végétation ligneuse diminue avec le gradient pluviométrique, à l'exception des zones de conservation forestière qui présentent une densité plus importante (Fontes et Guinko, 1995). La végétation herbacée est dominée par les herbacées annuelles et les cultures annuelles (Ratzmann et al., 2016 ; Abdi et al., 2017).

Sites de collecte de la biomasse végétale fourragère

L'espace agraire du Burkina Faso est marqué par une forte fragmentation de l'occupation des sols en terres agricoles (champs), pâturages, forêts classées, et plantations d'arbres (vergers) (Knauer et al., 2017).

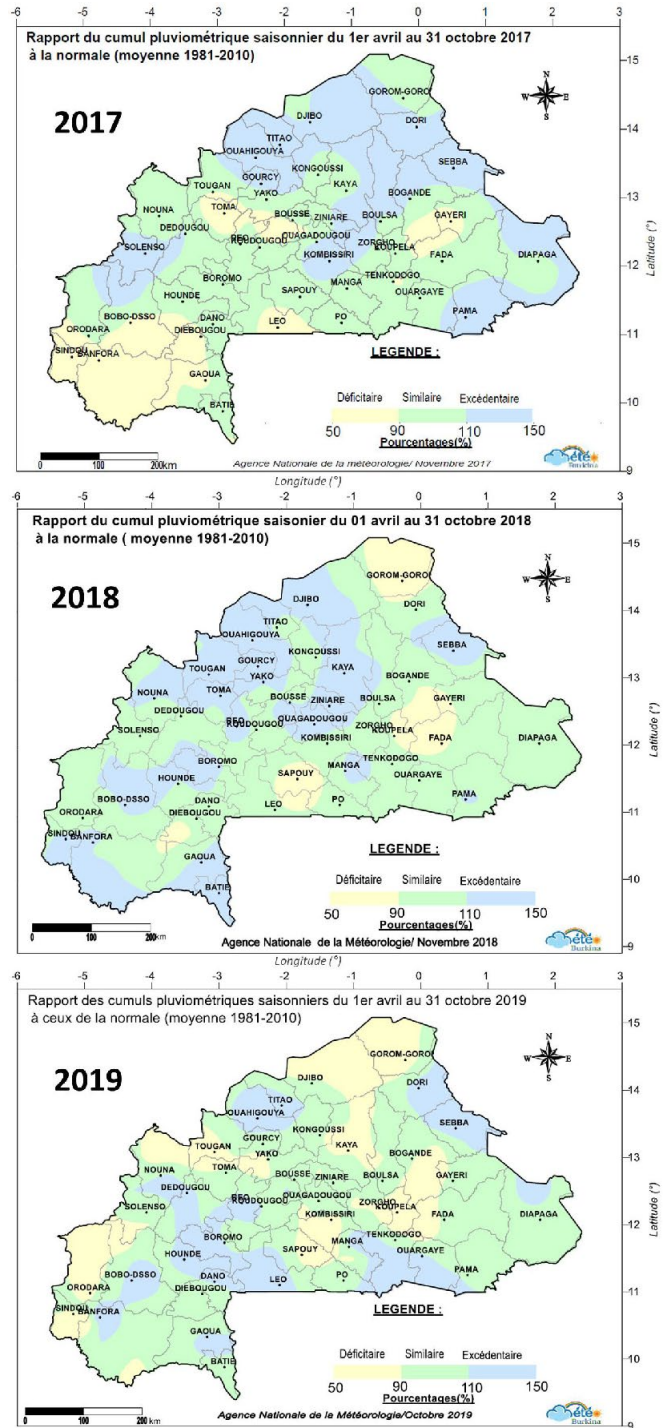


Figure 2 : Anomalies pluviométriques relevées du 1^{er} avril au 31 octobre pour les années 2017 à 2019 au Burkina Faso /// *Rainfall anomalies recorded from April 1st to October 31st for the years 2017 to 2019 in Burkina Faso*
 Source : World AgroMeteorological Information Service (<https://wamis.org/wamis/burkina-faso/>)

Le suivi-évaluation des rendements fourragers nécessite la mise en place d'un dispositif de collecte de la biomasse végétale fourragère sur le terrain. En outre, l'évaluation des ressources végétales repose sur des normes agroécologiques et statistiques (Floc'h, 2007 ; Daget et al., 2010 ; Picard et al., 2012), ce qui implique la mise en place de sites de collecte qui soient représentatifs des faciès écologiques existants. Ainsi, la mise en place des sites de collecte est généralement effectuée sur la base des écorégions (Tappan et al., 2016). Pour cette

étude, chaque écorégion a été stratifiée en zones plus homogènes sur la base de la capacité de rétention en eau des sols (WHC : Water Holding Capacity) (Reynolds et al., 2000). Le choix d'un site potentiel de collecte a également reposé sur des critères d'accessibilité, avec une préférence pour les zones pastorales et les anciens sites de collecte de l'Institut de l'Environnement et de la Recherche Agricoles (INERA) pour des raisons de sécurité et de contrôle. Au total, 80 sites potentiels ont été retenus pour le dispositif national. Ce nombre correspond à un idéal pour l'évaluation des pâturages au Burkina Faso, car il est suffisamment élevé pour permettre le remplacement d'un site qui serait momentanément inaccessible pour des raisons sécuritaires par un autre site au sein de la même écorégion.

La phase d'identification des sites potentiels de collecte a été suivie par une phase de validation et d'installation des sites sur le terrain, menée avec les communautés locales. La validation a consisté à identifier, avec les acteurs locaux de la gestion des ressources naturelles, l'emplacement des sites selon des critères précis, essentiellement l'accessibilité, l'exclusion des lieux de cultes et des zones de conservation locales non prises en compte dans la base de données d'occupation des terres (BDOT) de 2012.

La taille d'un site a été fixée à 1 km×1 km et à 500 m×500 m respectivement dans les espaces climatiques sahélien et soudanien. La taille des sites a été réduite dans l'espace soudanien du fait de l'expansion importante des cultures et de la difficulté en découlant de trouver des zones de pâturage de 1 km² qui soient homogènes et accessibles en saison pluvieuse. Entre 2017 et 2019, 156 échantillonnages ont été réalisés sur le terrain dont 36 en 2017, 63 en 2018 et 57 en 2019. La figure 3 présente l'ensemble des sites qui ont été échantillonnés sur cette période.

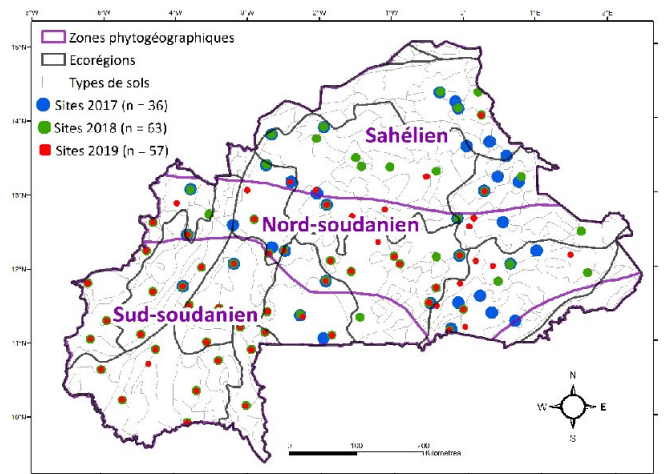


Figure 3 : Localisation des sites d'échantillonnage de la biomasse végétale fourragère réalisé entre 2017 et 2019 au Burkina Faso /// *Location of forage biomass sampling sites carried out between 2017 and 2019 in Burkina Faso*

Sources : zones phytogéographiques issues de la base nationale de données topographiques (BNDT), 2012 de l'Institut Géographique du Burkina ; écorégions issues du site internet <https://www.usgs.gov/index.php/centers/eros/science/ecological-regions> ; types de sols issus de la carte des sols du monde de la FAO (Reynolds et al., 2000)

Collecte des données de biomasse végétale fourragère

La biomasse végétale fourragère collectée dans les sites d'échantillonnage était composée de plantes herbacées et de feuilles de ligneux localisées à une hauteur inférieure à 2 mètres, soit celle accessible par le bétail. La période optimale de collecte sur le terrain a été déterminée chaque année par visualisation du profil NDVI de la saison de croissance végétale sur le site internet de FEWS NET

(<https://earlywarning.usgs.gov/fews>). Cette période correspond au pic de végétation et varie selon la physionomie de la campagne agropastorale et l'espace climatique considéré. Elle se situe entre la 3^e décennie de septembre et la 1^{re} décennie de novembre de chaque année (figure 4).

L'estimation de la biomasse des herbacées sur le terrain a été réalisée selon la méthode de la récolte intégrale de Levang et Grouzis (1980) et de Fournier (1990). Un transect de 700 m (espace soudanien) ou de 1 400 m (espace sahélien) a été effectué sur l'une des diagonales du site. Ainsi tous les 23 m (espace soudanien) ou 45 m (espace sahélien), la biomasse herbacée a été fauchée dans un carré de rendement de 1 m². Sur chaque site, 30 carrés de rendement ont été délimités. L'herbe fauchée dans chaque carré de rendement a été pesée à l'état frais sur le terrain et son poids noté sur une fiche de collecte. Deux échantillons de 250 g d'herbe fraîche fauchée ont été prélevés et séchés à l'air libre pour évaluer la quantité de matière sèche.

L'estimation de la biomasse des feuilles de ligneux localisées à une hauteur inférieure à 2 mètres a été réalisée au niveau de placettes carrées de 2 500 m² (50 m x 50 m) dans l'espace soudanien et de 10 000 m² (100 m x 100 m) dans l'espace sahélien. Dans la majorité des cas, lorsque les formations ligneuses étaient homogènes au sein d'un site, une seule placette par site a été utilisée. Dans le cas contraire, une deuxième placette par site a pu être utilisée afin de mieux rendre compte de l'hétérogénéité ligneuse du site. Chaque placette a été implantée sur un emplacement représentatif du site. Dans chaque placette, les différentes espèces ligneuses ont été identifiées et dénombrées. Ensuite, un arbre test par espèce, représentatif de la placette (arbre moyen), a été identifié. La biomasse foliaire de l'arbre test a été estimée à partir d'une seule de ses branches. La proportion du volume de l'arbre test accessible au bétail que représente la branche sélectionnée a été estimée visuellement (par exemple 1/10^e, 1/20^e, 1/100^e). Les feuilles issues de la branche sélectionnée ont été prélevées et pesées. Ce poids a été ensuite multiplié par l'inverse de la proportion présentée précédemment pour obtenir le poids total des feuilles accessibles au bétail de l'arbre test. Ce poids a été ensuite multiplié par le nombre d'arbres de l'espèce au sein de la placette pour obtenir la biomasse foliaire totale accessible au bétail de chaque espèce ligneuse. La somme pour l'ensemble des espèces ligneuses a

été ensuite réalisée. Enfin, les feuilles ont été séchées à l'air libre et pesées pour déterminer la biomasse exprimée en matière sèche.

Données satellitaires : variables phénologiques et agroclimatiques

La liste des variables satellitaires retenues pour cette étude a été établie sur la base de travaux portant sur la modélisation des pâturages sahéliens (Diouf et al., 2015 ; Garba et al., 2015). Ces études reposaient sur l'utilisation d'une liste restreinte de variables en lien avec le cycle de développement végétal, et traduisant soit des causes de ce développement (ex. : pluviométrie), soit l'évaluation de ce développement en tant que tel (ex. : indice spectral permettant d'évaluer la quantité de végétation) (Diouf et al., 2015 ; Garba et al., 2015 ; Tian et al., 2016). Les abréviations et définitions des 29 variables retenues pour cette étude sont présentées dans le tableau I.

Pour le calcul des variables, la période d'avril à octobre a été retenue pour chaque année d'étude, afin de prendre en considération la repousse précoce des herbacées pérennes et des autres ligneux fourragers sous l'effet des précipitations (Fournier, 1990 ; Brandt et al., 2019 ; Zhang et al., 2019).

La valeur de chaque variable satellitaire correspond à la moyenne des pixels intersectant le site de collecte. Les logiciels ArcGIS et SPIRITS (Software for the Processing and Interpretation of Remotely sensed Image Time Series) (Eerens et al., 2014) ont été utilisés pour l'extraction des valeurs des variables à partir des images satellitaires.

Variables phénologiques

Vingt-deux variables phénologiques caractérisant le profil d'évolution de la végétation au cours de la saison pluvieuse ont été produites par traitement de séries temporelles décennales de produits satellitaires NDVI (version 2.2, 11 variables) et FAPAR (version 2, 11 variables) à 1 km de résolution spatiale, issus de données du satellite PROBA-V, et librement accessibles sur le site Copernicus Global Land Service (CGLS) (<https://land.copernicus.vgt.vito.be/>).

Le NDVI est un indice de végétation calculé à partir des bandes spectrales du rouge et du proche infrarouge (Rouse et al., 1973). Le

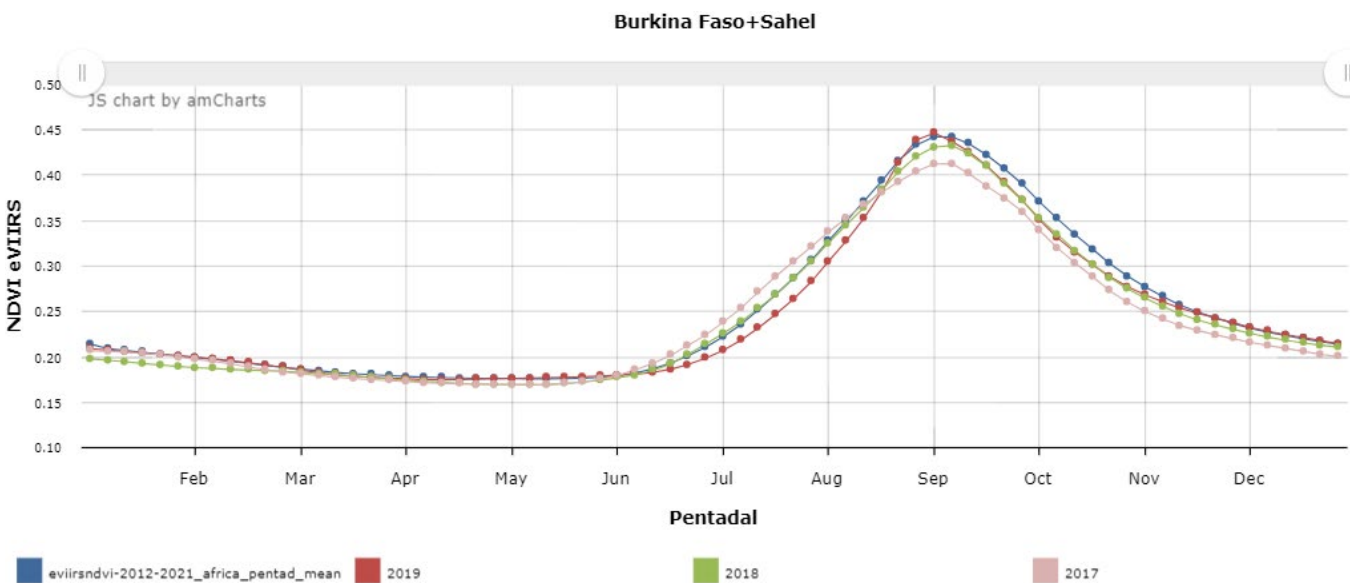


Figure 4 : Visualisation du pic de végétation par profil NDVI de la région du Sahel au Burkina Faso dans l'outil Early Warning Explorer Lite (EWX Lite), années 2017 à 2019 // Visualization of peak vegetation by NDVI profile of the Sahel region of Burkina Faso in the Early Warning Explorer Lite (EWX Lite) tool, years 2017 to 2019

Source : FEWS NET https://earlywarning.usgs.gov/fews/ewx_lite/index.html?region=af

Tableau 1 : Abréviation et définition des variables explicatives de la biomasse végétale fourragère calculées à partir de séries temporelles de données satellitaires sur la période de la campagne agropastorale allant de début avril à fin octobre, pour les années 2017, 2018 et 2019 : variables phénologiques (n = 2*11) et agroclimatiques (n = 7) // *Abbreviation and definition of explanatory variables for forage plant biomass calculated from time series of satellite data over the period of the agropastoral season from the beginning of April to the end of October, for the years 2017, 2018 and 2019: phenological (n = 2*11) and agroclimatic (n = 7) variables.*

Variables agroclimatiques	
AET_cum	Évapotranspiration réelle (cumul des données mensuelles)
CHIRPS_cum	Précipitations estimées selon la méthode CHIRPS* (cumul des données mensuelles)
RFE2_cum	Précipitations estimées selon la méthode RFE* version 2.0 (cumul des données mensuelles)
SM10_cum	Humidité du sol à 10 cm (cumul des données mensuelles)
SM10_moy	Humidité du sol à 10 cm (moyenne des données mensuelles)
LST_cum	Température de surface (cumul des données mensuelles)
LST_moy	Température de surface (moyenne des données mensuelles)
Variables phénologiques calculées à partir des séries temporelles NDVI* et FAPAR* (définitions adaptées de Eerens et al., 2014)	
Vav	Valeur moyenne (Vav), minimum (Vmn) ou maximum (Vmx) de la courbe NDVI ou FAPAR
Vmn	
Vmx	
Aup	Angle traduisant l'augmentation (Aup) ou la diminution (Adn) la plus importante de la phase de croissance (Aup) ou décroissance (Adn) de la courbe NDVI ou FAPAR entre 2 décades successives
Adn	
Rrg	Vmx-Vmn
Rsd	Écart-type des valeurs du NDVI ou du FAPAR calculé dans la gamme de valeurs de Rrg
Dmn	Date du (premier) Vmn
Dmx	Date du (dernier) Vmx
Dup	Date du (premier) Aup
Ddn	Date du (dernier) Adn

* NDVI : Normalized Difference Vegetation Index ; FAPAR : Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation ; CHIRPS : Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data ; RFE : Rainfall Estimates.

matériel végétal chlorophyllien absorbe fortement la lumière solaire dans la bande spectrale du rouge et la réfléchit fortement dans le domaine du proche infrarouge. Le NDVI est ainsi un indicateur de la quantité et de l'état de la matière végétale chlorophyllienne, et il est souvent considéré, par extension, comme un proxy de la quantité de biomasse verte (Gamon et al., 1995 ; Western et al., 2015).

Les images FAPAR sont calculées à partir des réflectances dans le domaine du visible et du proche infrarouge (Jacobs, 2019). Le FAPAR est la fraction du rayonnement solaire photosynthétiquement actif incident (400-700 nm) qui est absorbé par la végétation (Monteith, 1972 ; Gitelson et al., 2014). Celui-ci permet d'évaluer l'état de la végétation et sa productivité potentielle (Gitelson et al., 2014).

L'extraction des variables phénologiques s'est faite à l'aide du logiciel SPIRITS qui est recommandé pour le suivi-évaluation de la campagne

agropastorale à partir des produits satellitaires (Eerens et al., 2014). Avant d'extraire les variables phénologiques avec la fonction Pheno de SPIRITS, la série temporelle NDVI a été temporellement lissée pour atténuer l'effet des perturbations atmosphériques sur le signal satellitaire. Ce lissage temporel a été fait avec le filtre de Swets du logiciel SPIRITS. Il s'agit d'un algorithme basé sur une approche de régression linéaire utilisant la méthode des moindres carrés pondérés. La série temporelle FAPAR était quant à elle disponible au téléchargement déjà temporellement lissée (Jacobs, 2019).

Variables agroclimatiques

Sept variables relatives à des conditions agroclimatiques ayant joué un rôle dans le déclenchement de crises alimentaires passées ont été considérées. Il s'agit d'une part de données de précipitations (cumul des données mensuelles, 0,05x0,05 degré de résolution, CHIRPS et RFE2), de température de surface (cumul et moyenne des données mensuelles, 0,05x0,05 degré de résolution) et d'évapotranspiration réelle (cumul des données mensuelles, 1x1 km de résolution), toutes extraites depuis le site internet du Early Warning and Environmental Monitoring Program (EWEM) (<https://earlywarning.usgs.gov/>), et, d'autre part, de données d'humidité du sol de la couche 0-10 cm (cumul et moyenne des données mensuelles, 0,1x0,1 degré de résolution) provenant du site internet du FEWSNET Land Data Assimilation System (FLDAS) (<https://ldas.gsfc.nasa.gov/fldas>). Ces variables sont initialement produites à partir d'images satellitaires et de modèles. Les méthodes d'estimation de ces variables sont décrites par les travaux d'auteurs qui sont librement accessibles (Wan, 1999 ; NOAA/CPC, 2001 ; Savoca et al., 2013 ; Funk et al., 2015 ; McNally et al., 2017).

Modélisation statistique

La démarche statistique de cette étude a eu pour objectif d'identifier les meilleurs modèles uni et multivariés linéaires de prédiction de la biomasse végétale fourragère de chacun des six espaces climatiques du Burkina Faso à partir des 29 variables satellitaires présentées dans la section précédente.

Pour chaque espace climatique, une recherche exhaustive des meilleurs (sur base du R²) modèles statistiques linéaires comportant une, deux, trois ou quatre variables explicatives a été faite. Le nombre maximum de quatre variables a été choisi afin de limiter les problèmes de surajustement (*overfitting*) d'un modèle statistique, quatre étant jugé comme un maximum raisonnable dans le cadre de cette étude. Parmi les quatre meilleurs modèles par espace climatique, le meilleur modèle de chaque espace climatique a été identifié comme celui minimisant le « Bayesian Information Criterion » (BIC) (Schwarz, 1978 ; Burnham et Anderson, 2004). Le BIC pénalise la sélection de modèles comportant un trop grand nombre de variables et permet donc d'identifier des modèles plus parcimonieux.

Aucun effet d'interaction entre variables ou transformation de variables n'ont été appliqués préalablement à la recherche des modèles. Toutes les observations disponibles au sein d'un espace climatique donné ont été utilisées pour construire les modèles statistiques de cet espace.

La qualité des modèles produits a été évaluée par trois paramètres principaux :

RMSE : Root Mean Square Error (kg/ha), qui correspond à la racine carrée de la moyenne des erreurs au carré ;

RRMSE : Relative Root Mean Square Error (%), qui correspond au RMSE divisé par la valeur moyenne des observations ;

R² : coefficient de détermination linéaire de Pearson qui indique la proportion de la variance de la biomasse végétale fourragère qui est expliquée par le modèle.

Chacun de ces trois paramètres a été calculé de deux manières : (i) à partir des résultats de chaque modèle obtenu (le suffixe « ordinaire » accompagne alors ces paramètres), et (ii) en mode prédiction à l'aide d'une validation croisée de type leave-one-out (le suffixe « press », qui signifie « prediction error sum of squares », accompagne alors ces paramètres). De plus, le R² ajusté a été calculé pour chacun des modèles obtenus. Le R² ajusté atténue la valeur du R² sur base du nombre de paramètres inclus dans le modèle, et facilite ainsi la comparaison entre modèles utilisant un nombre de paramètres différent.

Les coefficients de corrélation de Pearson entre la biomasse végétale fourragère et chacune des 29 variables explicatives potentielles, dans chacun des six espaces climatiques du Burkina Faso, ont été calculés. Les corrélations entre variables deux à deux ont été systématiquement étudiées pour l'espace climatique national.

Toutes les analyses statistiques ont été menées dans le logiciel JMP Pro.

■ RESULTATS

Biomasse végétale fourragère

Toutes années confondues (2017, 2018, 2019), les valeurs des rendements fourragers moyens, exprimés en kg de matière sèche par ha, des sites évalués sur le terrain augmentent du nord au sud (figure 5), avec 732 kg/ha dans l'espace sahélien, 1 452 kg/ha dans l'espace nord-soudanien, et 1 875 kg/ha dans l'espace sud-soudanien. Un chevauchement relativement important des valeurs de rendement est cependant observé entre ces trois espaces climatiques, de même qu'une large gamme de dispersion de ces valeurs au sein de chaque espace climatique.

Corrélation de Pearson entre variables explicatives à l'échelle nationale

La figure 6 présente la matrice des coefficients de corrélation de Pearson de l'ensemble des variables étudiées à l'échelle nationale (156 sites).

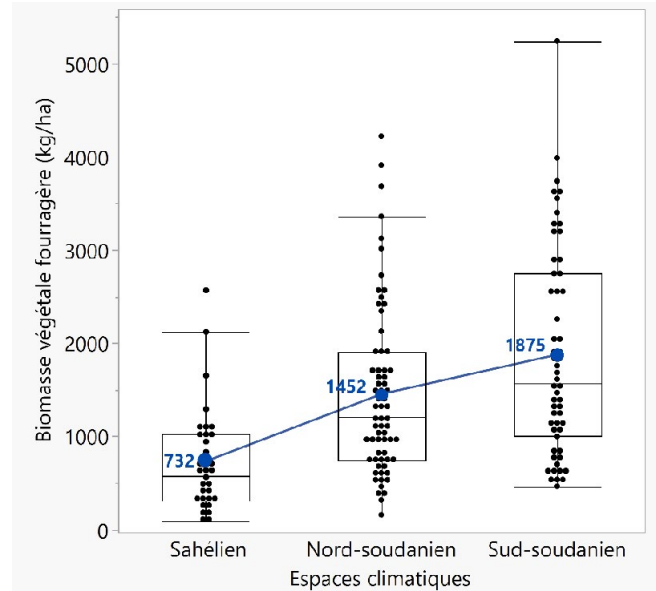


Figure 5 : Biomasse végétale fourragère totale (kg de matière sèche par ha) des sites évalués sur le terrain (années 2017, 2018 et 2019 confondues), dans les trois espaces climatiques du Burkina Faso. En bleu : moyenne par espace climatique. Les lignes horizontales dans les boîtes correspondent aux médianes, les limites inférieures et supérieures des boîtes correspondent aux 1^{er} et 3^e quartiles, et les « moustaches » correspondent aux valeurs minimales et maximales hors valeurs extrêmes. Les statistiques descriptives de base de toutes les variables étudiées (biomasse végétale fourragère et 29 variables explicatives) pour l'ensemble des 156 sites échantillonnés au Burkina Faso sont présentées dans le matériel supplémentaire I // In blue: average by climatic zone. The horizontal lines in the boxes correspond to the medians, the lower and upper limits of the boxes correspond to the 1st and 3rd quartiles, and the "whiskers" correspond to the minimum and maximum values excluding extreme values. Basic descriptive statistics for all variables studied (forage plant biomass and 29 explanatory variables) for all 156 sites sampled in Burkina Faso are presented in supplementary material I.

	BVF	Variables agroclimatiques							Variables phénologiques FAPAR											Variables phénologiques NDVI											
		CHIRPS_cum	RFE2_cum	SM10_cum	SM10_moy	AET	LST_cum	LST_moy	adn_fapar	aup_fapar	ddn_fapar	dmm_fapar	dmx_fapar	dnp_fapar	rrg_fapar	rsd_fapar	vav_fapar	vmm_fapar	vmx_fapar	adn_ndvi	aup_ndvi	ddn_ndvi	dmm_ndvi	dmx_ndvi	dnp_ndvi	rrg_ndvi	rsd_ndvi	vav_ndvi	vmm_ndvi	vmx_ndvi	
BVF	1.00	0.39	0.35	0.40	0.40	0.33	-0.35	-0.35	-0.12	0.29	0.27	-0.27	0.14	-0.24	0.45	0.35	0.48	0.29	0.51	0.04	0.22	0.08	-0.31	0.08	-0.21	0.41	0.38	0.48	0.33	0.47	
CHIRPS_cum	0.39	1.00	0.88	0.95	0.95	0.45	-0.73	-0.73	0.08	0.00	0.51	-0.43	0.25	-0.35	0.36	0.22	0.82	0.76	0.78	0.09	0.25	-0.19	-0.45	0.07	-0.21	0.49	0.41	0.80	0.74	0.76	
RFE2_cum	0.35	0.88	1.00	0.84	0.84	0.44	-0.73	-0.73	0.09	0.02	0.47	-0.47	0.18	-0.35	0.34	0.20	0.75	0.69	0.71	0.03	0.23	-0.17	-0.42	0.01	-0.25	0.47	0.38	0.74	0.67	0.70	
SM10_cum	0.40	0.95	0.84	1.00	1.00	0.43	-0.73	-0.73	0.06	0.01	0.49	-0.46	0.27	-0.40	0.37	0.22	0.81	0.72	0.76	0.05	0.28	-0.21	-0.46	0.09	-0.23	0.51	0.40	0.77	0.68	0.73	
SM10_moy	0.40	0.95	0.84	1.00	1.00	0.43	-0.73	-0.73	0.06	0.01	0.49	-0.46	0.27	-0.40	0.37	0.22	0.81	0.72	0.76	0.05	0.28	-0.21	-0.46	0.09	-0.23	0.51	0.40	0.77	0.68	0.73	
AET	0.33	0.45	0.44	0.43	0.43	1.00	-0.66	-0.66	0.03	0.20	0.27	-0.27	0.04	-0.53	0.42	0.27	0.73	0.58	0.69	-0.15	0.16	-0.08	-0.31	0.01	-0.35	0.48	0.40	0.72	0.57	0.66	
LST_cum	-0.35	-0.73	-0.73	-0.73	-0.73	-0.66	1.00	1.00	-0.07	-0.09	-0.37	0.42	0.02	0.54	-0.32	-0.14	-0.85	-0.77	-0.76	0.07	-0.20	0.20	0.37	0.09	0.39	-0.47	-0.35	-0.82	-0.70	-0.72	
LST_moy	-0.35	-0.73	-0.73	-0.73	-0.73	-0.66	1.00	1.00	-0.07	-0.09	-0.37	0.42	0.02	0.54	-0.32	-0.14	-0.85	-0.77	-0.76	0.07	-0.20	0.20	0.37	0.09	0.39	-0.47	-0.35	-0.82	-0.70	-0.72	
adn_fapar	-0.12	0.08	0.09	0.06	0.06	0.03	-0.07	-0.07	1.00	-0.13	-0.05	0.10	0.06	0.00	-0.15	-0.15	0.00	0.07	-0.05	0.33	-0.16	-0.13	0.09	-0.09	0.03	-0.12	-0.14	-0.02	0.06	0.06	
aup_fapar	0.29	0.00	0.02	0.01	0.01	0.20	-0.09	-0.09	-0.13	1.00	0.07	-0.13	-0.15	-0.23	0.39	0.36	0.18	-0.07	0.22	-0.23	0.40	-0.02	-0.14	-0.25	-0.25	0.35	0.34	0.22	-0.01	0.25	
ddn_fapar	0.27	0.51	0.47	0.49	0.49	0.27	-0.37	-0.37	-0.05	0.07	1.00	-0.27	0.33	-0.11	0.45	0.42	0.43	0.25	0.49	0.18	0.07	0.30	-0.56	0.12	-0.08	0.29	0.29	0.49	0.53	0.50	
dmm_fapar	-0.27	-0.43	-0.47	-0.46	-0.46	-0.27	0.42	0.42	0.10	-0.13	-0.27	1.00	-0.04	0.31	-0.31	-0.20	-0.46	-0.30	-0.42	0.17	-0.20	0.07	0.43	-0.05	0.25	-0.39	-0.32	-0.47	-0.31	-0.46	
dmx_fapar	0.14	0.25	0.18	0.27	0.27	0.04	0.02	0.06	-0.15	0.33	-0.04	1.00	0.08	0.05	0.10	0.04	0.05	0.07	0.14	-0.13	0.02	-0.18	0.60	0.22	0.01	0.06	0.05	0.19	0.12		
dnp_fapar	-0.24	-0.35	-0.35	-0.40	-0.40	-0.53	0.54	0.54	0.00	-0.23	-0.11	0.31	0.08	1.00	-0.31	-0.08	-0.59	-0.35	-0.46	0.10	-0.08	0.19	0.33	0.05	0.63	-0.36	-0.20	-0.59	-0.37	-0.46	
rrg_fapar	0.45	0.36	0.34	0.37	0.37	0.42	-0.32	-0.32	-0.15	0.39	0.45	-0.31	0.05	-0.31	1.00	0.93	0.51	0.04	0.73	-0.18	0.43	0.16	-0.42	0.01	-0.22	0.84	0.85	0.56	0.21	0.73	
rsd_fapar	0.35	0.22	0.20	0.22	0.22	0.27	-0.14	-0.14	-0.15	0.36	0.42	-0.20	0.10	-0.08	0.93	1.00	0.32	-0.10	0.58	-0.20	0.41	0.25	-0.27	0.03	-0.05	0.78	0.87	0.38	0.08	0.61	
vav_fapar	0.48	0.82	0.75	0.81	0.81	0.73	-0.85	-0.85	0.00	0.18	0.43	-0.46	0.04	-0.59	0.51	0.32	1.00	0.85	0.94	-0.09	0.33	-0.17	-0.48	-0.08	-0.39	0.64	0.51	0.99	0.82	0.91	
vmm_fapar	0.29	0.76	0.69	0.72	0.72	0.58	-0.77	-0.77	0.07	-0.07	0.25	-0.30	0.05	-0.35	0.04	-0.10	0.85	1.00	0.71	-0.03	0.17	-0.28	-0.26	-0.09	-0.18	0.28	0.16	0.80	0.85	0.66	
vmx_fapar	0.51	0.78	0.71	0.76	0.76	0.69	-0.76	-0.76	-0.05	0.22	0.49	-0.42	0.07	-0.46	0.73	0.58	0.94	0.71	1.00	-0.14	0.42	-0.08	-0.47	-0.06	-0.28	0.78	0.71	0.94	0.74	0.96	
adn_ndvi	0.04	0.09	0.03	0.05	0.05	-0.15	0.07	0.07	0.33	-0.23	0.18	0.17	0.14	0.10	-0.18	-0.20	-0.09	-0.03	-0.14	1.00	-0.35	0.10	-0.17	-0.08	-0.06	-0.42	-0.42	-0.08	0.17	-0.21	
aup_ndvi	0.22	0.25	0.23	0.28	0.28	0.16	-0.20	-0.20	-0.16	0.40	0.07	0.20	-0.13	-0.08	0.43	0.41	0.33	0.17	0.42	-0.35	1.00	-0.17	-0.08	-0.14	-0.03	0.54	0.54	0.31	0.06	0.43	
ddn_ndvi	0.08	-0.19	-0.17	-0.21	-0.21	-0.08	0.20	0.20	-0.13	-0.02	0.30	0.07	0.02	0.19	0.16	0.25	-0.17	-0.28	-0.08	0.10	-0.17	1.00	-0.07	0.07	0.04	-0.07	0.06	-0.11	-0.08	-0.09	
dmm_ndvi	-0.31	-0.45	-0.42	-0.46	-0.46	-0.31	0.37	0.37	0.09	-0.14	-0.56	0.43	-0.18	0.33	-0.42	-0.27	-0.48	-0.26	-0.47	-0.17	-0.08	-0.17	1.00	0.01	0.34	-0.27	-0.20	-0.55	-0.53	-0.49	
dmx_ndvi	0.08	0.07	0.01	0.09	0.09	0.01	0.09	0.09	-0.09	-0.25	0.12	-0.05	0.60	0.05	0.01	0.03	-0.08	-0.09	-0.06	-0.08	-0.14	0.07	0.01	1.00	0.01	0.21	0.06	0.20	-0.10	-0.13	-0.03
dnp_ndvi	-0.21	-0.21	-0.25	-0.23	-0.23	-0.35	0.39	0.39	0.03	-0.25	-0.08	0.25	0.22	0.63	-0.22	-0.05	-0.39	-0.18	-0.28	-0.06	-0.03	0.04	0.34	0.21	1.00	-0.12	-0.03	-0.42	-0.27	-0.24	
rrg_ndvi	0.41	0.49	0.47	0.51	0.51	0.48	-0.47	-0.47	-0.12	0.35	0.29	-0.39	0.01	-0.36	0.84	0.78	0.64	0.28	0.78	-0.42	0.54	-0.07	-0.27	0.06	-0.12	1.00	0.95	0.65	0.23	0.85	
rsd_ndvi	0.38	0.41	0.38	0.40	0.40	0.40	-0.35	-0.35	-0.14	0.34	0.29	-0.32	0.06	-0.20	0.85	0.87	0.51	0.16	0.71	-0.42	0.54	0.06	-0.20	0.07	-0.03	0.95	1.00	0.53	0.13	0.77	
vav_ndvi	0.48	0.80	0.74	0.77	0.77	0.72	-0.82	-0.82	-0.02	0.22	0.49	-0.47	0.05	-0.59	0.56	0.38	0.99	0.80	0.94	-0.08	0.31	-0.11	0.55	-0.10	-0.42	0.65	0.53	1.00	0.85	0.93	
vmm_ndvi	0.33	0.74	0.67	0.68	0.68	0.57	-0.70	-0.70	0.06	-0.01	0.53	-0.31	0.19	-0.37	0.21	0.08	0.82	0.85	0.74	0.17	0.06	-0.08	-0.53	-0.13	-0.27	0.23	0.13	0.85	1.00	0.71	
vmx_ndvi	0.47	0.76	0.70	0.73	0.73	0.66	-0.72	-0.72	-0.06	0.25	0.50	-0.46	0.12	-0.46	0.73	0.61	0.91	0.66	0.96	-0.21	0.43	-0.09	-0.49	-0.03	-0.24	0.85	0.77	0.93	0.71	1.00	

Figure 6 : Matrice des coefficients de corrélation de Pearson de l'ensemble des variables étudiées à l'échelle nationale (156 sites) // Matrix of Pearson correlation coefficients for all variables studied at national level (156 sites)

Abréviation des noms des variables : conférer tableau I // Variable name abbreviations: see Table I.

Code couleur des coefficients de corrélation de Pearson : 1.00 0.00 -1.00

Concernant les variables agroclimatiques, les deux variables de type cumul et moyenne calculées pour l'humidité du sol à 10 cm (SM10_cum et SM10_moy), ou pour la température de surface (LST_cum et LST_moy), présentent, logiquement, une corrélation de 1, ce qui les rend redondantes dans le cadre de la recherche de modèles statistiques d'estimation de la biomasse végétale fourragère. Une corrélation relativement importante ($r = 0,88$) est observée pour les deux variables relatives à la pluviométrie (CHIRPS_cum, RFE2_cum), ce qui traduit une certaine convergence entre ces deux sources de données. Une corrélation importante est aussi observée entre les variables d'humidité du sol et celles des précipitations ($r = 0,84$ et $0,95$ respectivement).

Concernant les variables phénologiques, les variables FAPAR sont généralement très peu corrélées entre-elles, à l'exception notamment

du trio de variables vav, vmn, vmx, et du duo de variables rsd et rrg. La même observation est valable pour les variables NDVI. Les corrélations entre variables phénologiques FAPAR et NDVI (figure 6, zone centrale inférieure, et figure 7) sont majoritairement faibles, mais quelques couples de variables sont hautement à très hautement corrélés, en particulier lorsqu'il s'agit du même type de variable calculé à partir du FAPAR ou du NDVI (ex. : $r = 0,99$ pour vav_fapar et vav_ndvi).

Les variables agroclimatiques sont peu corrélées à la majorité (16 sur 22) des variables phénologiques ($0 \leq r \leq 0,54$), mais présentent par contre une corrélation plus importante avec les six variables phénologiques FAPAR et NDVI de type vav, vmn, vmx ($0,57 \leq |r| \leq 0,85$), ce qui s'explique par le lien de cause à effet entre les conditions météorologiques et le développement de la végétation.

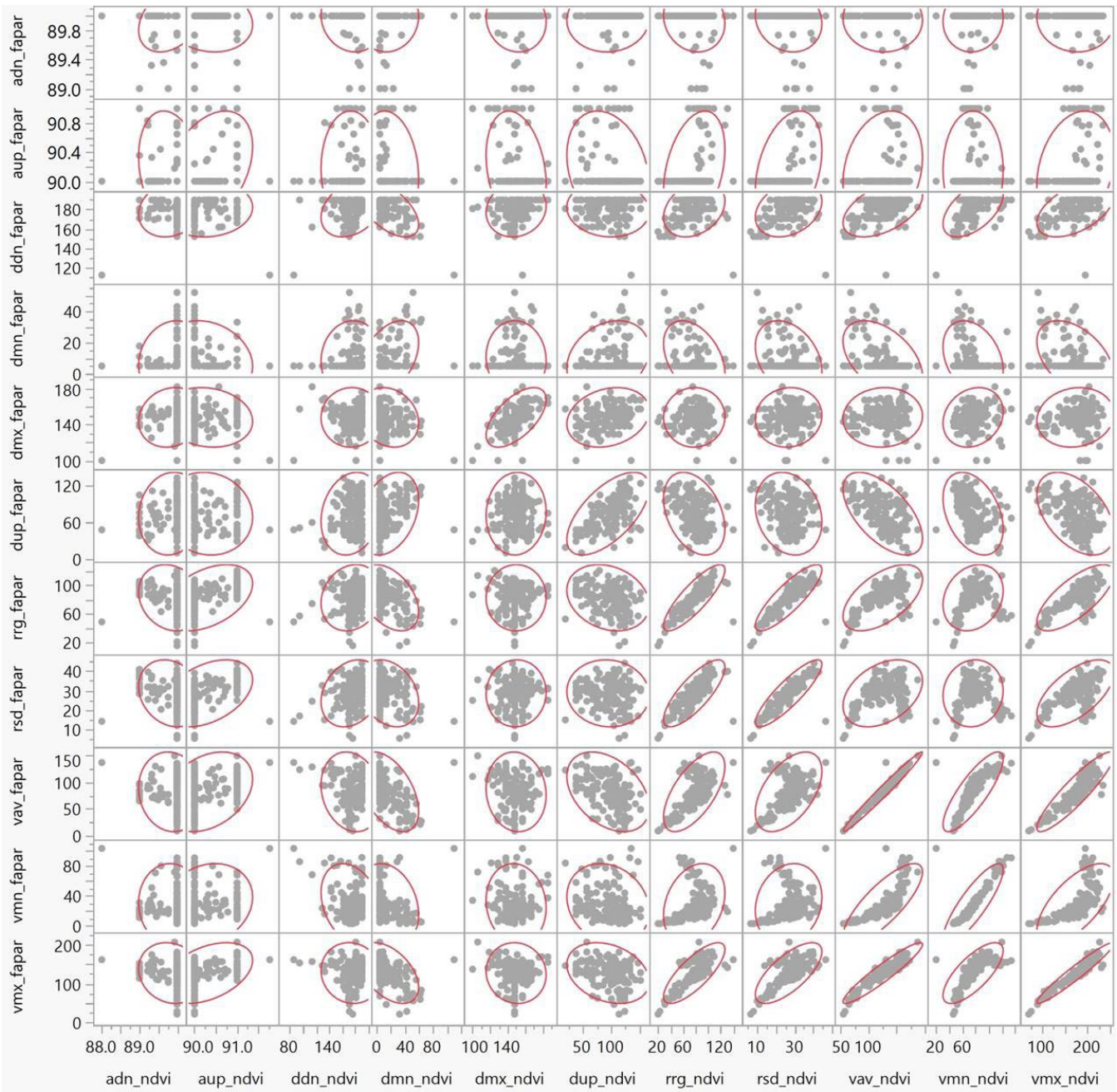


Figure 7 : Matrice des graphiques de nuages de points des variables dérivées du FAPAR en fonction des variables dérivées du NDVI à l'échelle nationale (156 sites) // *Scatterplot matrix of FAPAR-derived variables versus NDVI-derived variables at national scale (156 sites)*
 En rouge : ellipse de densité des points. Abréviation des noms des variables : conférer tableau I // *In red: point density ellipse. Variable name abbreviations: see Table I*

Corrélation de Pearson entre la biomasse végétale fourragère et les variables explicatives

La figure 8 et le tableau II présentent respectivement les valeurs absolues et les valeurs réelles des coefficients de corrélation de Pearson des 29 variables avec la biomasse végétale fourragère dans les trois ou six espaces climatiques considérés.

Il en ressort que la corrélation baisse progressivement suivant le gradient de latitude nord-sud pour la majorité des variables (18 sur 29). La diminution de corrélation est forte et quasi systématique (27 variables sur 29) de l'espace sahélien au nord-soudanien. L'évolution de l'espace nord-soudanien vers le sud-soudanien est plus hétérogène avec des diminutions ou augmentations plus légères, voire des stabilisations. En particulier, quelques variables (8), dont *aup_fapar* et *rsd_fapar*, présentent une baisse de corrélation de l'espace sahélien à l'espace nord-soudanien, puis une remontée de corrélation de l'espace nord-soudanien à l'espace sud-soudanien (figure 8). Notons encore que les deux variables, *dup_ndvi* et *adn_fapar*, présentent une évolution nord-sud atypique de leur corrélation avec la biomasse végétale fourragère, avec un pic de corrélation atteint dans l'espace intermédiaire nord-soudanien (figure 8).

Le classement des espaces climatiques par ordre décroissant des moyennes des valeurs absolues des corrélations calculées sur toutes les 29 variables correspond à l'ordre suivant : sahélien ($r = 0,52$), sahélien et nord-soudanien ($r = 0,38$), burkinabè (national) ($r = 0,31$), nord-soudanien ($r = 0,19$), nord-soudanien et sud-soudanien ($r = 0,16$), sud-soudanien ($r = 0,11$) (dernière ligne du tableau II). Le même ordre est observé lorsque l'on considère individuellement les groupes de variables agroclimatiques, phénologiques FAPAR, ou phénologiques NDVI, à l'exception d'une inversion mineure de l'ordre pour les variables agroclimatiques dans les espaces nord-soudanien et nord-soudanien-sud-soudanien. Les moyennes des valeurs absolues de corrélation sont tirées à la hausse par l'espace climatique sahélien dans les trois espaces l'incluant, avec notamment pour conséquence de meilleures corrélations dans l'espace national burkinabè que dans les deux espaces nord-soudanien et sud-soudanien, ou leur combinaison, plus petits et plus homogènes que l'espace national.

Dans l'espace sahélien, les variables *vav_fapar* ($r = 0,81$) et *vav_ndvi* ($r = 0,80$) sont les variables qui présentent la meilleure corrélation avec la biomasse végétale fourragère. Six autres variables présentent des corrélations supérieures ou égales à 0,70 (tableau II). Dans l'espace nord-soudanien, les variables *vav_fapar* ($r = 0,43$), *vmx_fapar* ($r = 0,38$) et *vav_ndvi* ($r = 0,43$) présentent les plus fortes valeurs de corrélation. Dans l'espace sud-soudanien la variable *aup_fapar* ($r = 0,39$) est celle qui présente nettement la plus grande corrélation, mais celle-ci présente une faible corrélation dans les espaces sahélien et nord-soudanien comparativement à d'autres variables. Au niveau national, les variables FAPAR et NDVI de type *vav* et *vmx* sont les variables qui présentent la meilleure corrélation avec la biomasse végétale fourragère ($0,47 \leq r \leq 0,51$) (tableau II).

Dans l'espace sud-soudanien, quatre variables issues du FAPAR présentent des valeurs absolues de corrélation égales ou supérieures à 0,2, alors que celles issues du NDVI restent toutes inférieures à 0,2. Cela pourrait peut-être s'expliquer sur base de deux éléments : (i) l'espace climatique sud-soudanien présente une couverture nuageuse plus importante que les deux autres espaces plus au nord ; (ii) les produits FAPAR présenteraient une meilleure qualité que les produits NDVI, meilleure qualité qui proviendrait d'un meilleur prétraitement permettant une plus grande atténuation de l'effet perturbateur des nuages sur les images FAPAR, et par là une meilleure sensibilité à l'évolution des conditions de végétation.

Les variables agroclimatiques présentent de très faibles valeurs de corrélation dans les espaces climatiques nord-soudanien et sud-soudanien (figure 8), ce qui pourrait s'expliquer par le fait que ces

variables ne correspondent pas à des facteurs limitant fortement la croissance de la végétation dans ces deux espaces.

L'ordre des variables selon leur valeur de corrélation avec la biomasse végétale fourragère n'est pas le même dans les trois espaces climatiques (figure 8), ce qui traduit la variabilité de leur intérêt relatif dans ces différents espaces dans le cadre de l'estimation de la biomasse végétale fourragère.

Modèles de prédiction de la biomasse végétale fourragère

Le tableau III présente les meilleurs modèles d'estimation de la biomasse végétale fourragère pour chacun des six espaces climatiques

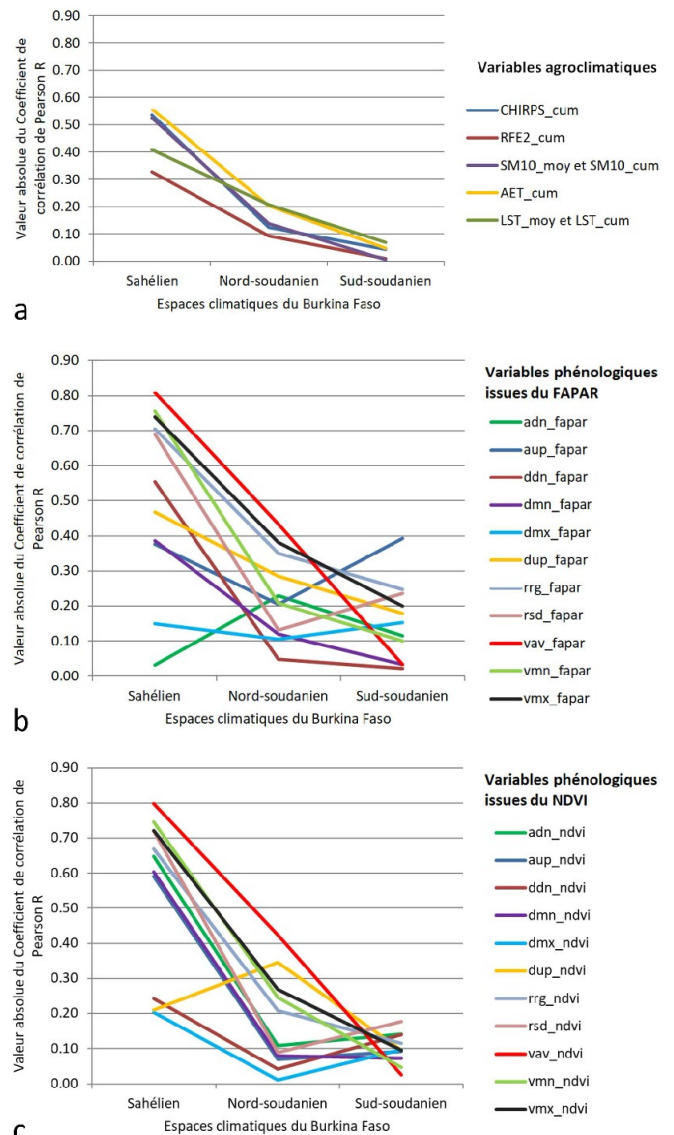


Figure 8 : Évolution, dans les 3 espaces climatiques sahélien, nord-soudanien et sud-soudanien du Burkina Faso, des valeurs du coefficient de corrélation de Pearson entre la biomasse végétale fourragère des pâturages, et (a) les 7 variables agroclimatiques, (b) les 11 variables phénologiques issues du FAPAR et (c) les 11 variables phénologiques issues du NDVI // Evolution, in the 3 Sahelian, North-Sudanese and South-Sudanese climatic zones of Burkina Faso, of Pearson correlation coefficient values between forage plant biomass of pastures and (a) the 7 agroclimatic variables, (b) the 11 phenological variables derived from FAPAR and (c) the 11 phenological variables derived from NDVI

Abréviation des noms des variables : confer tableau I.

Tableau II : Coefficient de corrélation de Pearson entre la biomasse végétale fourragère des pâturages et les 29 variables explicatives potentielles dans les six espaces climatiques du Burkina Faso /// *Pearson correlation coefficient between forage plant biomass from pastures and the 29 potential explanatory variables in the six climatic zones of Burkina Faso*

Espaces climatiques		Sahélien	Sahélien et nord-soudanien	Nord-soudanien	Nord-soudanien et sud-soudanien	Sud-soudanien	Burkinabè (national)
Variables		(n=33)	(n = 100)	(n = 67)	(n= 123)	(n= 56)	(n= 156)
7 variables agroclimatiques	CHIRPS_cum	0.54	0.42	0.12	0.18	-0.04	0.39
	RFE2_cum	0.33	0.35	0.09	0.16	-0.01	0.35
	SM10_cum	0.52	0.41	0.14	0.19	0.01	0.40
	SM10_moy	0.52	0.41	0.14	0.19	0.01	0.40
	AET_cum	0.56	0.39	0.20	0.15	-0.05	0.33
	LST_cum	-0.41	-0.40	-0.21	-0.17	0.07	-0.35
	LST_moy	-0.41	-0.40	-0.21	-0.17	0.07	-0.35
11 variables phénologiques FAPAR	adn_fapar	-0.03	-0.26	-0.23	-0.08	0.11	-0.12
	aup_fapar	0.38	0.25	0.21	0.29	0.39	0.29
	ddn_fapar	0.55	0.36	0.05	0.03	-0.02	0.27
	dmn_fapar	-0.39	-0.28	-0.12	-0.13	-0.03	-0.27
	dmx_fapar	0.15	0.05	-0.10	0.07	0.15	0.14
	dup_fapar	-0.47	-0.42	-0.28	-0.08	0.18	-0.24
	rrg_fapar	0.70	0.54	0.35	0.26	0.25	0.45
	rsd_fapar	0.69	0.45	0.13	0.15	0.24	0.35
	vav_fapar	0.81	0.61	0.43	0.28	-0.03	0.48
	vmn_fapar	0.76	0.47	0.21	0.13	-0.10	0.29
	vmx_fapar	0.74	0.56	0.38	0.34	0.20	0.51
11 variables phénologiques NDVI	adn_ndvi	-0.65	-0.09	0.11	0.15	0.14	0.04
	aup_ndvi	0.59	0.24	0.07	0.11	0.09	0.22
	ddn_ndvi	0.24	0.14	0.04	0.06	0.14	0.08
	dmn_ndvi	-0.60	-0.36	-0.08	-0.11	-0.07	-0.31
	dmx_ndvi	0.20	0.12	-0.01	0.03	0.10	0.08
	dup_ndvi	-0.21	-0.34	-0.35	-0.15	0.10	-0.21
	rrg_ndvi	0.67	0.48	0.21	0.17	0.11	0.41
	rsd_ndvi	0.72	0.45	0.09	0.14	0.18	0.38
	vav_ndvi	0.80	0.60	0.42	0.29	-0.03	0.48
	vmn_ndvi	0.75	0.51	0.25	0.15	-0.05	0.33
	vmx_ndvi	0.72	0.52	0.27	0.27	0.10	0.47
Moyenne des valeurs absolues des corrélations	7 variables agroclimatiques	0.47	0.40	0.16	0.17	0.04	0.37
	11 variables phénologiques FAPAR	0.52	0.39	0.23	0.17	0.16	0.31
	11 variables phénologiques NDVI	0.56	0.35	0.17	0.15	0.10	0.27
	29 variables	0.52	0.38	0.19	0.16	0.11	0.31

Abréviation des noms des variables : confor tableau I ; n : nombre de sites analysés

Code couleur du coefficient de corrélation de Pearson 1.0 0.5 0.0 -0.5 -1.0

Tableau III : Meilleurs modèles d'estimation de la biomasse végétale fourragère pour chacun des six espaces climatiques du Burkina Faso, incluant 1 à 4 variables explicatives, et paramètres d'évaluation de la qualité de ces modèles /// Best models for estimating forage plant biomass for each of Burkina Faso's six climatic zones, including 1 to 4 explanatory variables, and parameters for assessing the quality of these models

Espaces climatiques du Burkina Faso	Nombre de sites	Nombre de variables	Variables sélectionnées dans les meilleurs modèles	RMSE ordinaire (kg/ha)	RMSE press (kg/ha)	RRMSE ordinaire (%)	RRMSE press (%)	R ² ordinaire	R ² press	R ² ajusté ordinaire	AICc	BIC
National	156	1	vmx_fapar	879	884	60.5	60.9	0.26	0.25	0.26	2562	2571
		2	vmx_fapar, aup_fapar	862	874	59.4	60.2	0.30	0.26	0.29	2557	2569
		3	vmx_fapar, aup_fapar, dmx_ndvi	849	865	58.5	59.6	0.32	0.28	0.31	2553	2568
		4	vmx_fapar, aup_fapar, dmx_ndvi, adn_ndvi	832	851	57.3	58.6	0.35	0.30	0.34	2548	2566
Sahélien	33	1	vav_fapar	339	358	46.3	48.9	0.65	0.59	0.64	483	487
		2	ddn_ndvi, vav_ndvi	305	345	41.7	47.2	0.73	0.62	0.71	478	482
		3	vav_fapar, ddn_ndvi, adn_ndvi	277	321	37.9	43.9	0.78	0.67	0.76	473	478
		4	ddn_ndvi, vav_ndvi, vmn_ndvi, LST_moy	266	309	36.4	42.2	0.81	0.69	0.78	472	478
Sahélien et nord-soudanien	100	1	vav_fapar	703	712	57.9	58.6	0.37	0.34	0.36	1599	1607
		2	vav_fapar, adn_fapar	689	707	56.7	58.2	0.40	0.35	0.39	1596	1606
		3	vav_fapar, adn_fapar, adn_ndvi	675	700	55.6	57.6	0.43	0.36	0.41	1593	1606
		4	adn_fapar, adn_ndvi, vav_ndvi, vmn_ndvi	671	700	55.2	57.6	0.44	0.36	0.42	1593	1608
Nord-soudanien	67	1	vav_fapar	828	844	57.0	58.1	0.19	0.13	0.18	1095	1101
		2	vav_fapar, adn_fapar	808	836	55.6	57.6	0.24	0.15	0.21	1093	1101
		3	adn_fapar, adn_ndvi, vav_ndvi	776	813	53.4	56.0	0.31	0.19	0.28	1089	1099
		4	adn_fapar, adn_ndvi, vav_ndvi, dmx_ndvi	768	808	52.9	55.6	0.33	0.20	0.29	1089	1100
Nord-soudanien et sud-soudanien	123	1	vmx_fapar	972	981	59.1	59.6	0.12	0.09	0.11	2046	2054
		2	vmx_fapar, aup_fapar	947	964	57.6	58.6	0.17	0.12	0.16	2040	2051
		3	vmx_fapar, aup_fapar, dmx_ndvi	930	952	56.5	57.9	0.21	0.14	0.19	2037	2051
		4	vmx_fapar, aup_fapar, dmx_ndvi, adn_ndvi	910	935	55.3	56.8	0.25	0.17	0.22	2033	2049
Sud-soudanien	56	1	aup_fapar	1043	1075	55.6	57.3	0.15	0.07	0.14	942	947
		2	aup_fapar, dmx_fapar	1013	1051	54.0	56.0	0.22	0.11	0.19	940	947
		3	aup_fapar, dmx_fapar, vmx_fapar	998	1045	53.2	55.7	0.25	0.12	0.21	939	948
		4	aup_fapar, dmx_fapar, vmx_fapar, vmn_ndvi	976	1035	52.0	55.2	0.30	0.14	0.25	938	949

En gras : le meilleur modèle de chaque espace climatique (minimisation du paramètre BIC). Abréviation des noms des variables : conférer tableau I. /// In bold: the best model for each climate space (minimization of the BIC parameter). Abbreviations of variable names: see Table I.
 RMSE : Root Mean Squared Error ; RRMSE : Relative Root Mean Squared Error ; ordinaire : paramètre calculé directement à partir du modèle obtenu ; press : paramètre calculé en validation croisée de type leave-one-out ; R² : coefficient de détermination linéaire de Pearson ; AICc : corrected Akaike's Information Criterion ; BIC : Bayesian Information Criterion.

du Burkina Faso, incluant 1 à 4 variables explicatives, et les paramètres d'évaluation de la qualité de ces modèles.

Le tableau IV présente les équations du meilleur modèle d'estimation de la biomasse végétale fourragère dans chacun des six espaces climatiques du Burkina Faso. Le meilleur modèle au sein d'un espace climatique donné s'entend ici comme le modèle minimisant le paramètre BIC lors de la régression linéaire multivariée autorisant la sélection de 1 à 4 variables explicatives maximum.

Parmi les différents paramètres d'évaluation de la qualité des modèles repris dans le tableau III, ceux correspondant à une validation croisée de type leave-one-out (suffixe « press ») seront utilisés en priorité pour appuyer l'analyse des résultats étant donné que ces paramètres sont plus représentatifs de la performance des modèles en situation de réutilisation ultérieure. Notons à ce propos que la différence entre les RRMSE ordinaire et press est minime pour l'ensemble des modèles de l'ensemble des espaces climatiques (0 à 3 %), à l'exception de l'espace climatique sahélien où cette différence peut atteindre 3 à 6 %.

Performance des modèles

La performance de l'ensemble des modèles obtenus est assez faible, avec des RRMSE press qui varient entre 55 % et 61 % pour l'ensemble des modèles obtenus excepté pour l'espace sahélien qui affiche un RRMSE press compris entre 42 % et 49 %, ce qui le distingue assez nettement des autres espaces comme celui permettant la production de modèles de meilleure qualité (tableau III et figure 9). L'observation des R² confirme cette analyse, avec un R² press de maximum 0,36 (R² ordinaire maximum de 0,44) dans l'ensemble des espaces climatiques excepté l'espace sahélien, et une moyenne des R² press des modèles quadrivariés de ces espaces de 0,23 (R² ordinaire moyen de 0,33) seulement, ce qui contraste avec un R² press de 0,69 (R² ordinaire de 0,81) pour le modèle quadrivarié de l'espace sahélien. La baisse de qualité des modèles selon le gradient nord-sud est mieux mise en évidence par l'évolution des R² que des RRMSE, avec pour les modèles quadrivariés, les valeurs suivantes : espace climatique sahélien, RRMSE press = 42 %, R² press = 0,69 ; espace climatique nord-soudanien, RRMSE press = 56 %, R² press = 0,20 ; espace climatique sud-soudanien, RRMSE press = 55 %, R² press = 0,14.

Au sein de chacun des espaces climatiques, excepté l'espace sahélien, une très faible différence de performance est observée entre les modèles utilisant une ou quatre variables, avec des différences de RRMSE press allant de 1 % pour l'espace sahélien-et-nord-soudanien à 3 % pour l'espace nord-soudanien-et-sud-soudanien. Cette différence est de 7 % pour l'espace sahélien. Cette observation met en lumière la très faible plus-value des modèles multivariés comparés

aux modèles univariés, excepté pour l'espace sahélien pour lequel cette plus-value est plus significative.

Les modèles des trois espaces climatiques correspondant à des territoires géographiques plus petits, c.-à-d. les espaces sahélien, nord-soudanien, et sud-soudanien, présentent une performance très légèrement supérieure (RRMSE press des modèles à quatre variables de 42 %, 56 % et 55 % respectivement) à ceux des trois espaces plus grands, c.-à-d. les espaces national, sahélien-et-nord-soudanien, et nord-soudanien-et-sud-soudanien (RRMSE press des modèles à quatre variables de 59 %, 58 % et 57 % respectivement).

Performance relative des variables

Les variables agroclimatiques apparaissent inutiles dans la prédiction de la biomasse végétale fourragère en comparaison aux variables issues du NDVI et du FAPAR étant donné qu'elles ne sont jamais retenues dans les meilleurs modèles utilisant une à quatre variables, à l'exception du modèle de l'espace sahélien à quatre variables qui reprend la variable LST_moy (tableau III). Cependant, une modélisation à quatre variables pour l'espace sahélien ne se basant que sur des variables phénologiques (RRMSE press = 44,6 %, R² press = 0,66, résultats non montrés dans le tableau III) permet d'obtenir un modèle d'une performance similaire, bien que légèrement moindre, à celle du modèle incluant la variable agroclimatique (RRMSE press = 42,2 %, R² press = 0,69, tableau III).

Les variables issues du FAPAR apparaissent comme étant plus performantes que celles issues du NDVI, étant donné que les meilleurs modèles univariés et bivariés de tous les espaces climatiques n'utilisent que des variables FAPAR (vmx, vav, aup, adn, dmx), à l'exception du modèle bivarié de l'espace sahélien qui utilise deux variables NDVI (ddn et vav). Les modèles trivariés et quadrivariés présentent quant à eux généralement un mélange de variables FAPAR et NDVI, indiquant une certaine complémentarité de ces deux sources de variables. Parmi les 22 variables FAPAR et NDVI, seules cinq variables FAPAR (vmx, vav, adn, dmx, aup) et six variables NDVI (vmx, vav, adn, dmx, vmn, ddn) sont reprises dans les meilleurs modèles uni à quadri variés présentés dans le tableau III. Les quatre types de variables vmx, vav, adn, dmx sont communs aux variables FAPAR et NDVI reprises dans ces modèles.

■ DISCUSSION

Variation de la performance des modèles selon les espaces climatiques

La faible performance générale des modèles produits dans le cadre de cette étude (49 % ≤ RRMSE press ≤ 61 % pour les modèles univariés)

Tableau IV : Équation des meilleurs modèles* d'estimation de la biomasse végétale fourragère pour chaque espace climatique du Burkina Faso /// Equation of the best models* for estimating forage plant biomass for each climatic zones in Burkina Faso

Espaces climatiques du Burkina Faso	Équation des meilleurs modèles d'estimation de la biomasse végétale fourragère*
National	-125877.5 + 831.4 aup_fapar + 15.6 vmx_fapar + 537.8 adn_ndvi + 13.9 dmx_ndvi
Sahélien	-10922.1 + 116.3 LST_moy + 36.0 ddn_ndvi + 49.2 vav_ndvi - 59.3 vmn_ndvi
Sahélien et nord-soudanien	45176.9 - 976.2 adn_fapar + 23.0 vav_fapar + 471.3 adn_ndvi
Nord-soudanien	35614.1 - 1172.1 adn_fapar + 756.6 adn_ndvi + 27.0 vav_ndvi
Nord-soudanien et sud-soudanien	-140267.2 + 953.5 aup_fapar + 17.3 vmx_fapar + 570.5 adn_ndvi + 15.2 dmx_ndvi
Sud-soudanien	-138072.9 + 1526.0 aup_fapar + 15.8 dmx_fapar

* Meilleur modèle : modèle minimisant le paramètre BIC lors de la régression linéaire multivariée autorisant la sélection de 1 à 4 variables explicatives maximum. Abréviation des noms des variables : conférer tableau I /// Best model: model minimizing the BIC parameter in multivariate linear regression, allowing selection of 1 to 4 explanatory variables at most. Abbreviations of variable names: see Table I.

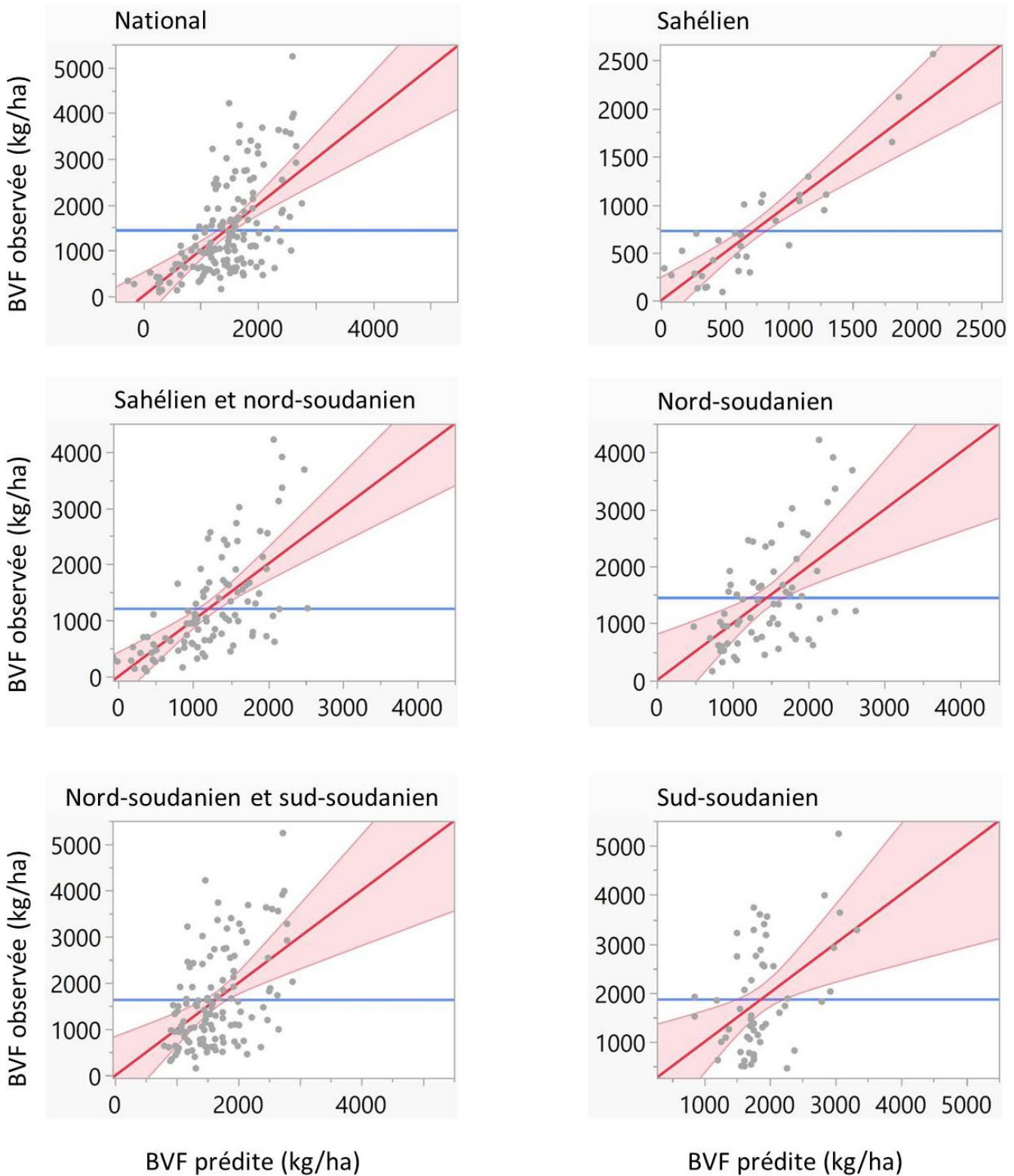


Figure 9 : Valeurs de biomasse végétale fourragère (BVF) observées et prédites par le meilleur modèle* pour chaque espace climatique du Burkina Faso /// Forage plant biomass (BVF) values observed and predicted by the best model* for each climatic zones in Burkina Faso

* Meilleur modèle : modèle minimisant le paramètre Bayesian Information Criterion (BIC) lors de la régression linéaire multivariée autorisant la sélection de 1 à 4 variables explicatives maximum /// Best model: model minimizing the Bayesian Information Criterion (BIC) parameter in multivariate linear regression, allowing selection of 1 to 4 explanatory variables at most.

Légende : Droite bleue : la valeur observée moyenne. Droite rouge : la droite d'ajustement théorique parfait ($x = y$). Aire rose : intervalle de confiance à 95 % de la droite de régression, soit la plage de valeurs ayant une probabilité de 95 % de contenir la droite de régression de la population correspondante aux données utilisées qui, elles, forment l'échantillon. La droite de régression de l'échantillon n'est pas montrée. Les paramètres d'évaluation de la qualité de ces meilleurs modèles sont présentés dans le tableau III, en gras. Les formules de ces meilleurs modèles sont présentées dans le tableau IV /// Blue line: the average observed value. Red line: the theoretical perfect fit ($x = y$). Pink area: 95% confidence interval of the regression line, i.e. the range of values with a 95% probability of containing the regression line of the population corresponding to the data used, which form the sample. The sample regression line is not shown. The quality assessment parameters for these best models are shown in bold in Table III. The formulas for these best models are shown in Table IV

est similaire à celles trouvées dans les travaux menés au Niger par Garba et al. (2015) (RRMSE de modèles univariés de 47 % en zone saharienne, 51 % en zone nord-sahélienne, 57 % en zone sahélienne) et Schucknecht et al. (2017) (RRMSE en cross validation du meilleur modèle univarié de 54 %). Ces résultats ont amené ces auteurs à reconnaître la nécessité d'améliorer ces modèles.

La baisse, observée dans cette étude, selon le gradient nord-sud, de la performance des modèles d'estimation de la biomasse végétale fourragère, et de la corrélation des variables explicatives avec cette biomasse, a également été observée dans des travaux de modélisation des pâturages menés au Sénégal par Tian et al. (2016).

Cette baisse de performance des modèles selon le gradient nord-sud dans cette région du monde peut s'expliquer en partie par une nébulosité croissante vers les latitudes Sud, nébulosité qui impacte directement la qualité des produits satellitaires (NDVI, FAPAR, etc.). Lambert et al. (2016) ont rapporté que la contamination des images satellitaires par les nuages et leur ombrage au Sahel (entre 9° et 18° de latitude Nord) augmentait vers les latitudes Sud. Le degré de pollution des images par les nuages au Sahel serait étroitement lié à la qualité de pénétration de la mousson au cours des saisons des pluies, les saisons pluvieuses étant marquées par des développements nuageux importants. Néanmoins, selon Lambert et al. (2016), les probabilités de disposer d'images de bonne qualité en fin de saison de croissance végétale ne sont pas négligeables. Ainsi, l'existence de variables à forte corrélation avec la biomasse végétale fourragère offre des possibilités de développer des modèles d'estimation de rendements fourragers (Löv et Duveiller, 2014 ; Diouf et al., 2015 ; Lo et al., 2022).

D'autres facteurs peuvent potentiellement expliquer la baisse de performance des modèles vers les latitudes Sud : (i) une variation inter-saisonnière des conditions de végétation plus importante et plus marquée dans les zones nord relativement à celles du sud, liée à un climat plus sec et à la moins grande présence de végétation dans les zones nord, et permettant une meilleure sensibilité des produits satellitaires à la dynamique de développement de la végétation dans les zones nord ; (ii) une plus grande hétérogénéité spatiale des pâturages due à la densité plus importante de ligneux dans l'espace climatique soudanien (au sud), comparé à l'espace sahélien (au nord) ; (iii) une difficulté d'évaluer avec précision la biomasse foliaire des grands ligneux sur le terrain par la méthode visuelle de l'arbre test, en particulier dans les formations végétales plus denses surtout présentes en zone soudanienne (au sud).

Cette étude a montré une très légère amélioration de la performance des modèles développés sur les trois plus petits espaces climatiques (RRMSE press des modèles à quatre variables de 42 % à 56 %) comparés aux modèles des trois espaces climatiques les plus grands (RRMSE press des modèles à quatre variables de 57 % à 59 %). Cette observation est similaire à celle déjà faite par d'autres travaux de modélisation des rendements de pâturages au Sénégal et au Niger qui ont prouvé des gains de précision pour l'estimation des rendements fourragers dans les zones de végétation plus homogènes, à savoir les écorégions au Sénégal et les espaces bioclimatiques au Niger (Diouf et al., 2015 ; Garba et al., 2017 ; Schucknecht et al., 2017).

Recommandations pour la collecte des données de terrain

La modélisation de la relation entre des données de surface et des données de télédétection, pixellaires par nature, demande, afin d'améliorer la performance des modèles, la minimisation des facteurs qui perturbent cette relation, en particulier au niveau de la surface étudiée. Concernant la modélisation de la biomasse végétale fourragère, il faudra ainsi veiller à sélectionner des sites dont la taille et la localisation permettent de minimiser les facteurs de perturbation

principaux qui sont, dans le cadre de cette étude, la présence d'occupation du sol autre que des espaces de pâturages (cultures) et la présence de grands ligneux. Ces aspects ont déjà été mis en évidence par une série d'auteurs (Woodcock et Strahler, 1987 ; Hoefsloot et al., 2012 ; Löv et Duveiller, 2014 ; Durgun et al., 2020).

Par ailleurs, dans la plupart des études d'évaluation de la valeur pastorale des pâturages au Sahel, qui ont pour objectif d'évaluer à la fois la quantité de biomasse et sa qualité (mesurée par la diversité des espèces végétales), et qui reposent sur l'analyse de terrain d'un transect par la méthode des points quadrats, la taille des sites d'observation est généralement de 1 km² afin d'assurer la bonne représentativité des faciès écologiques présents sur le terrain (Levang et Grouzis, 1980). Selon Diouf et al. (2015), lorsque ces études intègrent des images satellitaires, celles-ci sont de basse résolution (1 km×1 km).

S'il est possible de trouver des pixels purs (homogènes) à basse résolution aux États-Unis et en Russie, ces derniers sont presque inexistantes en Afrique et en Europe (Hoefsloot et al., 2012), ce qui entraîne des difficultés de modélisation à partir de la basse résolution dans ces contextes géographiques. À ce propos, Durgun et al. (2020) ont montré la décroissance continue de la performance de prédiction du rendement du blé en Europe à partir d'images satellitaires de résolution spatiale décroissante (100 m, 300 m et 1 km).

Dans le cadre de cette étude, des données satellitaires de 1 km de résolution spatiale ont été utilisées. Vu la spécificité des paysages burkinabè, en particulier dans le sud, qui présentent une relativement grande hétérogénéité spatiale avec un mélange de zones de cultures et de pâturage et la présence de grands ligneux, cette résolution spatiale rend difficile l'identification de pixels « purs » qui seraient composés uniquement de pâturages. Lors de la collecte des données de terrain, de nombreux sites étaient à proximité de champs cultivés. De plus, il a été constaté, lors de la phase d'extraction des variables à partir des images satellitaires, que certains sites de collecte de la biomasse intersectaient plusieurs pixels, agrandissant *de facto* la superficie considérée pour cette extraction, et donc le risque d'inclusion d'une occupation du sol autre que celle d'intérêt. Ces éléments contribuent ainsi à l'extraction d'un signal télédétection composite (pâturages, cultures, grands ligneux) et *in fine* à la perturbation de la modélisation de la biomasse végétale fourragère à partir des données de télédétection, comme déjà mentionné par Chen et al. (2016) et Durgun et al. (2020).

Dans l'optique de réduire les erreurs des modèles d'estimation de la biomasse végétale fourragère, il semble nécessaire d'améliorer le couplage entre les données de biomasse végétale fourragère collectées sur le terrain et les variables extraites des images satellitaires. À cette fin, les recommandations suivantes sont formulées : (a) veiller à ce que chaque site de collecte soit inclus dans un seul pixel et ne soit donc pas à cheval sur plusieurs pixels ; (b) veiller à ce que chaque site de collecte présente uniquement une occupation du sol correspondant aux zones de pâturage à évaluer, et n'inclue pas d'autres types d'occupation du sol non concernés par l'évaluation (cultures, habitat, etc.). Si cela n'est pas possible, il est nécessaire de chercher à minimiser la présence de ces autres occupations du sol dans le pixel évalué ; (c) veiller à ce que chaque site de collecte ne présente pas une trop forte densité de grands ligneux pouvant fortement impacter le signal enregistré par les produits satellitaires ; (d) utiliser une carte d'occupation du sol précise et récente et/ou des images satellitaires récentes à haute ou très haute résolution spatiale (Google Satellite, Planet) pour identifier et localiser des sites de collecte répondant aux critères susmentionnés ; (e) utiliser des données satellitaires d'une résolution plus fine que 1 km, par exemple 300 m (PROBA-V, Sentinel-3 OLCI) ou 250 m (MODIS), ce qui permettrait de réduire la taille des sites de collecte sur le terrain, et donc de faciliter l'identification de sites présentant uniquement une occupation du sol correspondant aux zones de pâturage à évaluer ; (f) compléter la collecte de données de terrain par

une estimation des biomasses herbacée et ligneuse à partir d'imagerie drone. Cette technique permettra peut-être d'obtenir des estimations plus représentatives des sites évalués grâce à une analyse plus systématique d'une plus grande superficie de ces derniers. Cette méthode, si elle est efficace et suffisamment calibrée, pourrait potentiellement remplacer à terme les collectes manuelles et les estimations visuelles. Enfin, notons qu'une autre perspective d'amélioration de l'estimation des rendements fourragers est d'identifier d'autres techniques de modélisation (modélisation non linéaire par exemple) et/ou d'autres variables explicatives qui donneraient de meilleurs résultats que ceux obtenus dans le cadre de cette étude.

■ CONCLUSION

Cette étude a, pour la première fois, évalué la possibilité d'estimer les rendements fourragers des pâturages dans les espaces climatiques du Burkina Faso via l'utilisation de modèles statistiques linéaires uni et multivariés construits à partir de données de biomasse végétale fourragère collectée sur le terrain et de variables satellitaires phénologiques et agroclimatiques. Elle constitue de la sorte une démarche originale et novatrice visant l'amélioration de l'évaluation des ressources fourragères au Burkina Faso qui est un élément clé pour la gouvernance des crises alimentaires du bétail.

La performance de l'ensemble des modèles obtenus est cependant assez faible, avec pour l'ensemble des espaces climatiques excepté l'espace sahélien, des RRMSE press qui varient entre 55 % et 61 % (R^2 press compris entre 0,07 et 0,36), et pour l'espace climatique sahélien des RRMSE press compris entre 42 % et 49 % (R^2 press compris entre 0,59 et 0,69).

Afin d'améliorer la performance des modèles, une série de recommandations a été identifiée pour, en particulier, améliorer le couplage entre les données de biomasse végétale fourragère collectées sur le terrain et les variables extraites des images satellitaires.

Remerciements

Cette recherche a été possible grâce à un financement de bourse de mobilité doctorale par l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (ARES) de la Fédération Wallonie-Bruxelles de Belgique. Celle-ci a permis le séjour d'un doctorant au sein de l'unité de recherche SPHERES, au Département des Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège (ULIEGE). Pour cela, nous remercions vivement la Coopération au développement belge pour le soutien à la réalisation de cette étude. Les données de terrain de biomasse végétale fourragère ont été obtenues dans le cadre du dispositif national burkinabè de suivi-évaluation des ressources pastorales. Pour cela, nous remercions le Dr André KIEMA de l'INERA, président du Comité Scientifique National d'Appui au Suivi et à l'Évaluation des Ressources Pastorales (COSSERP), et tout le personnel technique impliqué dans la collecte et la validation des données de terrain.

Conflits d'intérêts

L'étude a été réalisée sans aucun conflit d'intérêts.

Déclaration des contributions des auteurs

WS, AD, BHN, AGMB et BT ont participé à la conception ou planification de l'étude. WS a participé à la collecte des données de terrain. WS a construit la base de données contenant l'ensemble des variables étudiées. WS et AD ont participé à l'analyse et à l'interprétation des données. WS, AD et BT ont participé à la rédaction de la première version du manuscrit. WS, AD, ALK, BD, BHN, AGMB et BT ont participé à la révision critique du manuscrit.

REFERENCES

- Abdi A., Boke-Olén N., Tenenbaum D., Tagesson T., Cappelaere B., Ardö J., 2017. Evaluating Water Controls on Vegetation Growth in the Semi-Arid Sahel Using Field and Earth Observation Data. *Remote Sens.*, **9** (3): 294, doi: 10.3390/rs9030294
- Adole T., Dash J., Atkinson P.M., 2016. A systematic review of vegetation phenology in Africa. *Ecol. Inform.*, **34**: 117-128, doi: 10.1016/j.ecoinf.2016.05.004
- Bégué A., Leroux L., Soumaré M., Faure J.F., Diouf A.A., Augusseau X., Touré L., et al., 2020. Remote Sensing Products and Services in Support of Agricultural Public Policies in Africa: Overview and Challenges. *Front. Sustain. Food Syst.*, **4**: 58, doi: 10.3389/fsufs.2020.00058
- Brandt M., Hiernaux P., Rasmussen K., Tucker C.J., Wigneron J.P., Diouf A.A., Herrmann S.M., et al., 2019. Changes in rainfall distribution promote woody foliage production in the Sahel. *Commun. Biol.*, **2** (1): 1-10, doi: 10.1038/s42003-019-0383-9
- Burnham K.P., Anderson D.R., 2004. Multimodel Inference: Understanding AIC and BIC in Model Selection. *Sociol. Methods Res.*, **33** (2): 261-304, doi: 10.1177/0049124104268644
- Chen Y., Song X., Wang S., Huang J., Mansaray L.R., 2016. Impacts of spatial heterogeneity on crop area mapping in Canada using MODIS data. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, **119**: 451-461, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2016.07.007
- Dage P., Poissonet J., Huguenin J., 2010. Prairies et Pâturages - Méthodes d'étude de terrain et interprétations. CIRAD, Montpellier, France, 955 p.
- Diouf A., Brandt M., Verger A., Jarroudi M., Djaby B., Fensholt R., Ndione J., et al., 2015. Fodder Biomass Monitoring in Sahelian Rangelands Using Phenological Metrics from FAPAR Time Series. *Remote Sens.*, **7** (7): 9122-9148, doi: 10.3390/rs70709122
- Durgun Y.Ö., Gobin A., Duveiller G., Tychon B., 2020. A study on trade-offs between spatial resolution and temporal sampling density for wheat yield estimation using both thermal and calendar time. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform.*, **86**: 101988, doi: 10.1016/j.jag.2019.101988
- Eerens H., Haesen D., Rembold F., Urbano F., Tote C., Bydekerke L., 2014. Image time series processing for agriculture monitoring. *Environ. Model. Softw.*, **53**: 154-162, doi: 10.1016/j.envsoft.2013.10.021
- FAO, 2020. Estimation des bilans fourragers dans la région du Sahel d'Afrique de l'Ouest et Centrale. Sous la direction de Assouma M.H. et Mottet A. Production et santé animales – Directives n°22, FAO, Rome, Italie, 64 p., doi: 10.4060/ca9111fr
- Floc'h E.L., 2007. Guide méthodologique pour l'étude et le suivi de la flore et de la végétation. Observatoire du Sahara et du Sahel, Tunis, Tunisie, 175 p.
- Fontes J., Guinko S., 1995. Carte de la végétation et de l'occupation du sol au Burkina Faso. Notice explicative. Ministère de la Coopération française, Projet campus (8813101). Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 67 p.
- Fournier A.D.M., 1990. Phénologie, croissance et production végétales dans quelques savanes d'Afrique de l'Ouest. Thèse, Université de Paris 6, Paris, France, 502 p.
- Fritz S., See L., Bayas J.C.L., Waldner F., Jacques D., Becker-Reshef I., Whitcraft A., et al., 2019. A comparison of global agricultural monitoring systems and current gaps. *Agric. Syst.*, **168**: 258-272, doi: 10.1016/j.agry.2018.05.010
- Funk C., Peterson P., Landsfeld M., Pedreros D., Verdin J., Shukla S., Husak G., et al., 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Sci. Data*, **2**: 150066, doi: 10.1038/sdata.2015.66
- Gamon J.A., Field C.B., Goulden M.L., Griffin K.L., Hartley A.E., Joel G., Penuelas J., 1995. Relationships Between NDVI, Canopy Structure, and Photosynthesis in Three Californian Vegetation Types. *Ecol. Appl.*, **5** (1): 28-41, doi: 10.2307/1942049
- Garba I., Djaby B., Salifou I., Boureima A., Touré I., Tychon B., 2015. Évaluation des ressources pastorales au Sahel nigérien à l'aide des données NDVI issues de SPOT-VEGETATION et MODIS. *Photo Interprét. Eur. J. Appl. Remote Sens.*, **51** (1): 13-26
- Garba I., Salifou I., Djaby B., Toure I., Mohamed Sallah A.H., Adoum A., Samba A., et al., 2017. Performance of similarity analysis in the estimation of forage yields in the Sahelian zone of Niger. *Int. J. Sci. Eng. Res.*, **8** (2): 1072-1088
- Gitelson A.A., Peng Y., Huemmrich K.F., 2014. Relationship between fraction of radiation absorbed by photosynthesizing maize and soybean canopies and NDVI from remotely sensed data taken at close range and from MODIS 250m resolution data. *Remote Sens. Environ.*, **147**: 108-120, doi: 10.1016/j.rse.2014.02.014

- Gning M.C., 2005. Navigating the Livestock Sector: The Political Economy of Livestock Policy in Burkina Faso. PPLPI Working paper n°28, FAO, Rome, Italy, 43 p.
- Hoefsloot P., Ines A., Dam J.V., Duveiller G., Kayitakire F., Hansen J., 2012. Combining Crop Models and Remote Sensing for Yield Prediction: Concepts, Applications and Challenges for Heterogeneous Smallholder Environments. JRC Technical reports, European Commission, Luxembourg, 52 p.
- INSD, 2007. Analyse des résultats de l'enquête annuelle sur les conditions de vie des ménages en 2007. EA/QUIBB 2007, Ministère de l'économie et des finances, Burkina Faso, 182 p.
- Jacobs T., 2019. CGLOPS-1 Framework Service Contract N°199494 (JRC). Product user manual Leaf Area Index (LAI), Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (FAPAR), Fraction of Vegetation Cover (fcover). Collection 1km version 2, **1** (33): 1-56
- Johnson N., Njuki J., Waithanji E., Nhambeto M., Rogers M., Kruger E.H., 2015. The Gendered Impacts of Agricultural Asset Transfer Projects: Lessons from the Manica Smallholder Dairy Development Program. *Gen. Technol. Dev.*, **19** (2): 145-180, doi: 10.1177/0971852415578041
- Khamala E., 2017. Review of the available remote sensing tools, products, methodologies and data to improve crop production forecasts. FAO, Rome, Italy, 94 p.
- Knauer K., Gessner U., Fensholt R., Forkuor G., Kuenzer C., 2017. Monitoring agricultural expansion in Burkina Faso over 14 years with 30 m resolution time series: The role of population growth and implications for the environment. *Remote Sens.*, **9** (2): 132, doi: 10.3390/rs9020132
- Lambert M.J., Waldner F., Defourny P., 2016. Cropland mapping over Sahelian and Sudanian agrosystems: A Knowledge-based approach using PROBA-V time series at 100-m. *Remote Sens.*, **8** (3): 232, doi: 10.3390/rs8030232
- Leroux L., Bégué A., Lo Seen D., Jolivot A., Kayitakire F., 2017. Driving forces of recent vegetation changes in the Sahel: Lessons learned from regional and local level analyses. *Remote Sens. Environ.*, **191**: 38-54, doi: 10.1016/j.rse.2017.01.014
- Levang P., Grouzis M., 1980. Méthodes d'étude de la biomasse herbacée de formations sahéliennes : application à la Mare d'Oursi, Haute-Volta. *Acta Oecologica Plant.*, **1** (3): 231-244
- Lind M., Fensholt R., 1999. The spatio-temporal relationship between rainfall and vegetation development in Burkina Faso. *Geogr. Tidsskr.* **2**: 43-55
- Lo A., Diouf A.A., Diedhiou I., Bassène C.D.E., Leroux L., Tagesson T., Fensholt R., et al., 2022. Dry season forage assessment across senegalese rangelands using earth observation data. *Front. Env. Sci.*, **10**: 931299, doi: 10.3389/fenvs.2022.931299
- Löw F., Duveiller G., 2014. Defining the spatial resolution requirements for crop identification using optical remote sensing. *Remote Sens.*, **6** (9): 9034-9063, doi: 10.3390/rs6099034
- MAH, DGPER, DPSAA, 2011. *Rapport général du module pluvial. Phase 2: RGA 2008. Recensement général de l'agriculture (RGA)*. Ministère de l'Agriculture et de l'Hydraulique, Bureau central du recensement général de l'agriculture, Burkina Faso, 322 p.
- McNally A., Arsenault K., Kumar S., Shukla S., Peterson P., Wang S., Funk C., et al., 2017. A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications. *Sci. Data*, **4**: 1-19, doi: 10.1038/sdata.2017.12
- Meroni M., Rembold F., Verstraete M.M., Gommès R., Schucknecht A., Beye G., 2014. Investigating the relationship between the inter-annual variability of satellite-derived vegetation phenology and a proxy of biomass production in the Sahel. *Remote Sens.*, **6** (6): 5868-5884, doi: 10.3390/rs6065868
- Monteith J.L., 1972. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *J. Appl. Ecol.*, **9** (3): 747, doi: 10.2307/2401901
- MRAH, 2020. Plan de réponse et de soutien aux éleveurs vulnérables (PRSEV) de la Campagne Agropastorale 2020-2021. Ministère des Ressources Animales et Halieutiques (MRAH), Secrétariat permanent en charge de la gestion des crises et vulnérabilités en élevage, Burkina Faso
- Musau J., Patil S., Sheffield J., Marshall M., 2018. Vegetation dynamics and responses to climate anomalies in East Africa. *Earth Syst. Dynam. Discuss.* [preprint], doi: 10.5194/esd-2017-123
- Nkonya E., Place F., Kato E., Mwanjilolo M., 2015. Climate Risk Management Through Sustainable Land Management in Sub-Saharan Africa. In: Lal, R., Singh, B., Mwaseba, D., Kraybill, D., Hansen, D., Eik, L. (eds) Sustainable Intensification to Advance Food Security and Enhance Climate Resilience in Africa. Springer, Cham, Switzerland, 75-111, doi: 10.1007/978-3-319-09360-4_5
- NOAA/CPC, 2001. The NOAA Climate Prediction Center African Rainfall Estimation Algorithm Version 2.0
- Olsen J.L., Miede S., Ceccato P., Fensholt R., 2015. Does EO NDVI seasonal metrics capture variations in species composition and biomass due to grazing in semi-arid grassland savannas? *Biogeosciences*, **12** (14): 4407-4419, doi: 10.5194/bg-12-4407-2015
- Picard N., Saint-Andre L., Henry M., 2012. Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres: de la mesure de terrain à la prédiction. FAO, Rome, Italie et CIRAD, Montpellier, France, 220 p.
- PRAPS, 2017. Guide pratique pour l'harmonisation des dispositifs de suivi-évaluation des ressources pastorales dans les pays du PRAPS, 24 p.
- PREGEC, 2019. Avis sur les perspectives agricoles et alimentaires 2017-18 au Sahel et en Afrique de l'Ouest. Concertation technique du dispositif régional de Prévention et de Gestion des Crises alimentaires (PREGEC), Bamako, Mali 27-29 Nov. 2017, 2 p.
- Ratzmann G., Gangkofner U., Tietjen B., Fensholt R., 2016. Dryland vegetation functional response to altered rainfall amounts and variability derived from satellite time series data. *Biogeosci. Discuss.* [preprint]: 1-18, doi: 10.5194/bg-2016-48
- Reynolds C.A., Jackson T.J., Rawls W.J., 2000. Estimating soil water-holding capacities by linking the Food and Agriculture Organization Soil map of the world with global pedon databases and continuous pedotransfer functions. *Water Resour. Res.*, **36** (12): 3653-3662, doi: 10.1029/2000WR900130
- Richter M., 2016. Classifications of Climates in the Tropics. In: Tropical Forestry Handbook (Eds. Pancel L., Köhl M.). Springer, Berlin, Heidelberg, 293-301, doi: 10.1007/978-3-642-54601-3_35
- Rouse J.W., Haas R.H., Deering D.W., Schell J.A., Harlan J.C., 1973. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation. [Great Plains Corridor], Texas A&M University, Texas, USA, 390 p.
- Savoca M.E., Senay G.B., Maupin M.A., Kenny J.F., Perry C.A., 2013. Actual Evapotranspiration Modeling Using the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) Approach. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2013-5126, 16 p., doi: 10.3133/sir20135126
- Schucknecht A., Meroni M., Kayitakire F., Boureima A., 2017. Phenology-Based Biomass Estimation to Support Rangeland Management in Semi-Arid Environments. *Remote Sens.*, **9** (5): 463, doi: 10.3390/rs9050463
- Schwarz G., 1978. Estimating the Dimension of a Model. *Ann. Stat.*, **6** (2): 461-464, doi: 10.1214/aos/1176344136
- Tappan G.G., Cotillon S., Herrmann S., Cushing W.M., Hutchinson J.A., 2016. Landscapes of West Africa - A Window on a Changing World. United States Geological Survey, Garretson, USA, 219 p. doi: 10.5066/F7N014QZ
- Taugourdeau S., Cofélas F., Bossoukpe M., Diatta O., Ndiaye O., Diehdiou A., N'Goran A., et al., 2023. Unmanned aerial vehicle outputs and associated field measurements of the herbaceous and tree layers of the Senegalese savannah. *African Journal of Ecology*, **61** (3): 730-735, doi: 10.1111/aje.13123
- Thao N.T.T., Khoi D.N., Denis A., Viet L.V., Wellens J., Tychon B., 2022. Early Prediction of Coffee Yield in the Central Highlands of Vietnam Using a Statistical Approach and Satellite Remote Sensing Vegetation Biophysical Variables. *Remote Sens.*, **14** (13): 2975, doi: 10.3390/rs14132975
- Tian F., Brandt M., Liu Y.Y., Verger A., Tagesson T., Diouf A.A., Rasmussen K., et al., 2016. Remote sensing of vegetation dynamics in drylands: Evaluating vegetation optical depth (VOD) using AVHRR NDVI and in situ green biomass data over West African Sahel. *Remote Sens. Environ.*, **177**: 265-276, doi: 10.1016/j.rse.2016.02.056
- Valerio V.C., Walther O.J., Eilittä M., Cissé B., Munepeerakul R., Kiker G.A., 2020. Network analysis of regional livestock trade in West Africa. *PLOS ONE*, **15** (5): e0232681, doi: 10.1371/journal.pone.0232681
- Wan Z., 1999. MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD). Version 3.3.
- Western D., Mose V.N., Worden J., Maitumo D., 2015. Predicting Extreme Droughts in Savannah Africa: A Comparison of Proxy and Direct Measures in Detecting Biomass Fluctuations, Trends and Their Causes. *PLoS ONE*, **10** (8): e0136516, doi: 10.1371/journal.pone.0136516
- Woodcock C.E., Strahler A.H., 1987. The factor of scale in remote sensing. *Remote Sens. Environ.*, **21** (3): 311-332, doi: 10.1016/0034-4257(87)90015-0
- Zhang W., Brandt M., Penuelas J., Guichard F., Tong X., Tian F., Fensholt R., 2019. Ecosystem structural changes controlled by altered rainfall climatology in tropical savannas. *Nat. Commun.*, **10** (1): 671, doi: 10.1038/s41467-019-08602-6

Summary

Some W., Denis A., Kouadio A.L., Djaby B., Nacro H.B., Belem A. M.G., Tychon B. Estimating forage yields of rangeland in Burkina Faso's climatic zones using satellite data

The assessment of forage resources is a key element for governing livestock food crises in Burkina Faso. This study aims to evaluate, for the first time, the possibility of estimating forage yields in Burkina Faso's climatic zones using uni and multivariate linear statistical models constructed from forage plant biomass data collected in the field in 2017, 2018, and 2019, and phenological satellite variables (Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (FAPAR)) and agroclimatic variables (precipitation, soil moisture, evapotranspiration, surface temperature). An exhaustive search for the best linear statistical models with one to four variables was conducted, and the best models according to the Bayesian Information Criterion were identified. The performance of the uni to quadri-variate models obtained is quite low, with for all climatic zones except the Sahelian zone, RRMSE press ranging from 55% to 61% (R^2 press ranging from 0.07 to 0.36), and for the Sahelian climatic zone, RRMSE press ranging from 42% to 49% (R^2 press ranging from 0.59 to 0.69). The decrease in correlation of the majority of variables with forage plant biomass along the North-South gradient results in a decrease in model performance along this gradient. Agroclimatic variables were found to be useless, and those derived from FAPAR appeared to be generally more effective than those derived from NDVI. The results also show a very low added value of multivariate models compared to univariate models, except for the Sahelian zone, and a better performance of models developed in more homogeneous climatic zones. A series of recommendations have been identified to improve the coupling between field-collected forage plant biomass data and variables extracted from satellite images, and thereby improve the performance of the models.

Keywords: Pastures, forage yield, above ground biomass, agroclimatic zones, satellite imagery, linear models, Burkina Faso

Resumen

Some W., Denis A., Kouadio A.L., Djaby B., Nacro H.B., Belem A. M.G., Tychon B. Estimación del rendimiento forrajero de los pastos en las zonas climáticas de Burkina Faso mediante datos satelitales

La evaluación de los recursos forrajeros es un elemento clave en la gobernanza de las crisis alimentarias del ganado en Burkina Faso. Este estudio tenía como objetivo la evaluación, por primera vez, de la posibilidad de estimar los rendimientos forrajeros de los pastos en los espacios climáticos de Burkina Faso vía la utilización de modelos estadísticos lineales univariados y multivariados construidos a partir de datos de biomasa vegetal forrajera recopilados sobre el terreno en 2017, 2018 y 2019; de variables fenológicas de satélite (índice de vegetación de la diferencia normalizada [NDVI] y fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida [FAPAR]), y agroclimáticas (precipitaciones, humedad del suelo, evapotranspiración, temperatura de superficie...). Se realizó una investigación exhaustiva de los mejores modelos estadísticos lineales que comportan de una a cuatro variables y los mejores modelos según el criterio de información bayesiano (BIC) identificados. El rendimiento de los modelos de univariados a cuadrivariados obtenidos resultó bastante débil con, para el conjunto de los espacios climáticos excepto el espacio saheliano, RRMSE PRESS variando del 55 % al 61 % (R^2 PRESS de 0,07 a 0,36), y, para el espacio climático saheliano, RRMSE PRESS variando entre el 42 % y el 49 % (R^2 PRESS de 0,59 a 0,69). La baja correlación de la mayoría de las variables con la biomasa vegetal forrajera según el gradiente norte-sur causa una baja de rendimiento de los modelos según este gradiente. Las variables agroclimáticas no resultaron útiles, y las provenientes del FAPAR proporcionan globalmente un mejor rendimiento que las provenientes del NDVI. Se observó una plusvalía muy débil de los modelos multivariados comparados con modelos univariados, excepto para el espacio saheliano, y un mejor rendimiento de los modelos desarrollados en espacios climáticos más homogéneos. Se identificaron una serie de recomendaciones para mejorar el acoplamiento entre datos de biomasa vegetal forrajera recopilados sobre el terreno y variables extraídas de las imágenes de satélite, y así acrecentar el rendimiento de los modelos.

Palabras clave: Pastizales, rendimiento del forraje, biomasa sobre el suelo, zonas agroclimáticas, imágenes por satélites, modelos lineales, Burkina Faso

