

Imagerie satellitaire libre d'accès pour la prédiction de la diversité spécifique des arbres des forêts sèches soudanaises en Afrique de l'Ouest

Open access satellite imagery for predicting tree species diversity in Sudanese West African dry forests

Oméga Lydia Clarisse Gbedahi^{1*}, Sabi Bruno Bio Nikki Sare², Samadori Sorotori Honoré Biaou¹

¹Laboratoire d'écologie, de botanique et de biologie végétale (LEB), Faculté d'agronomie, Université de Parakou (UP), Bénin.

²Laboratoire d'études et de recherches forestières (LERF), Faculté d'agronomie, Université de Parakou (UP), Bénin.

Email : clarissegbedahi@gmail.com

ORCDI des Auteurs :

Oméga Lydia Clarisse GBEDAHY <https://orcid.org/0009-0002-7998-362X> ; Sabi Bruno BIO NIKKI SARE <https://orcid.org/0000-0002-9997-3907> Samadori Sorotori Honoré BIAOU <https://orcid.org/0000-0001-8836-8229>

Comment citer l'article : Oméga Lydia Clarisse Gbedahi, Sabi Bruno Bio Nikki Sare, Samadori Sorotori Honoré Biaou (2024) Imagerie satellitaire libre d'accès pour la prédiction de la diversité spécifique des arbres des forêts sèches soudanaises en Afrique de l'Ouest. *Revue Écosystèmes et Paysages*, 4(2) : 1-13, e-ISSN (Online) : 2790-3230

Doi: <https://doi.org/10.59384/recopays.tg41xx>

Reçu : 30 septembre 2024

Accepté : 15 décembre 2024

Publié : 30 décembre 2024



Copyright: Published under a Creative Commons Attribution (CC-BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Résumé

Les forêts tropicales sèches abritent une grande biodiversité. Mais elles sont en proie à une destruction rapide due à l'extension des terres agricoles et l'exploitation forestière excessive. Dans ce contexte, L'utilisation de l'imagerie satellitaire libre d'accès pour le monitoring des forêts favorise une science inclusive pour la conservation des forêts dans les pays à faible revenu. Dans cette étude nous avons évalué, pour les forêts sèches soudanaises du Bénin en Afrique de l'Ouest, les performances des capteurs Landsat 8, Landsat 9 et Sentinel 2A à prédire la diversité spécifique et déterminé les facteurs pouvant influencer la cartographie de cette diversité. Des modèles de prédiction RandomForest de la diversité spécifique pour chacun des satellites ont été élaborés puis évalué sur la base du coefficient de détermination (R^2) et de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). L'indice Q de Rao a servi à cartographier la diversité beta des forêts. Les résultats ont montré que chacun des trois modèles prédit la diversité spécifique à plus de 90% de précision. Le modèle Landsat 8 a produit les meilleures performances pour la prédiction de la richesse spécifique ($R^2= 0,997$, RMSE= 0,180) et les indices de diversité de Shannon ($R^2= 0,998$, RMSE= 0,015) et de Simpson ($R^2= 0,999$, RMSE= 0,003). Par ailleurs la cartographie de la diversité beta est influencée par la densité du couvert végétal tandis que la phénologie semble ne pas l'influencer. Cette étude dévoile le potentiel de l'imagerie satellitaire libre d'accès pour le monitoring et la conservation, à faible coût, de la biodiversité forestière.

Mots clés : Imagerie satellitaire libre d'accès, diversité spécifique, modèle prédictif RandomForest, forêts tropicales sèches, Afrique de l'Ouest.

Abstract

Tropical dry forests are home to great biodiversity. But they are undergoing rapid destruction due to agricultural expansion and excessive logging. In this context, the use of open-access satellite imagery for forest monitoring promotes inclusive science for forest conservation in low-income countries. In this study, we evaluated the performance of Landsat 8, Landsat 9 and Sentinel 2A sensors in predicting species diversity in the dry Sudanese forests of Benin in West Africa, and determined the factors that could influence the mapping of this diversity. RandomForest prediction models of species diversity for each satellite were developed and evaluated on the basis of coefficient of determination (R^2) and root mean square error (RMSE). Rao's Q index was used to map forest beta diversity. The results showed that each of the three models predicted specific diversity with over 90% accuracy. The Landsat 8 model produced the best performance for predicting species richness ($R^2= 0.997$, RMSE= 0.180) and the Shannon ($R^2= 0.998$, RMSE= 0.015) and Simpson ($R^2= 0.999$, RMSE= 0.003) diversity indices. Furthermore, beta diversity mapping was influenced by canopy density, while phenology did not appear to influence it. This study reveals the potential of freely available satellite imagery for low-cost monitoring and conservation of forest biodiversity.

Keywords: Open access satellite imagery, specific diversity, RandomForest predictive model, tropical dry forests, West Africa.

1. Introduction

Les forêts tropicales sèches renferment une grande biodiversité et sont d'une grande importance pour les populations locales qui y puisent la quasi-totalité de leur subsistance (Natta, 2003, Vodouhê et al., 2009, 2011, Ceperley *et al.*, 2010, Assede *et al.*, 2020 ; Sambian *et al.*, 2023). Plusieurs stratégies sont mises en œuvre pour la conservation de ces ressources (Mensah *et al.*, 2022; Noufe *et al.*, 2023). Les outils de suivi-évaluation de la biodiversité tels que les cartes et autres données d'indicateurs issus de la télédétection sont d'une importance incontestable pour la gestion et la conservation de ces forêts (Rampheri *et al.*, 2020, Dixon *et al.*, 2021). Mais dans les pays en développement tels que le Bénin, l'acquisition et le traitement des données de télédétection nécessaires pour les évaluations forestières telles qu'exécutées actuellement sont inaccessibles aux gestionnaires locaux à cause du coût élevé des données de télédétection utilisées et des compétences techniques nécessaires pour leur traitement. Dans ce contexte, l'utilisation des images Landsat et Sentinel 2 pour leur bonne résolution, leur fréquence de revisite d'à peine quelques jours et leur acquisition gratuite pourraient être adéquates (Turner *et al.*, 2015 ; Maïga *et al.*, 2023). En effet, des études récentes ont montré que les images du capteur Sentinel 2 permettent d'obtenir une précision de prédiction de la diversité des espèces d'arbres de 92% et 86,36% respectivement dans une forêt subtropicale d'Afrique du Sud, et une forêt tempérée d'Iran (Gyamfi-Ampadu *et al.*, 2021, Nasiri *et al.*, 2023). En ce qui concerne les capteurs de la mission Landsat, des prédictions d'espèces d'arbres de plus de 84% de précision ont été obtenues avec les images Landsat 8 (Nasiri *et al.*, 2023). Outre Landsat 8, les images Landsat 9 sont désormais disponibles en libre accès. Ce capteur fournit des images avec une résolution radiométrique plus élevée que celles de Landsat 8 et logiquement pourrait servir à prédire de manière satisfaisante la diversité des espèces des arbres forestiers. Quant aux méthodes utilisées pour la prédiction de la diversité des espèces d'arbres forestiers avec l'imagerie satellitaires open-sources, elles sont basées sur l'application de l'Hypothèse de Variation Spectrale (HVS). L'HVS stipule que la variabilité spectrale enregistrée par les capteurs de télédétection optiques se rapporte à la diversité taxonomique in-situ (Palmer *et al.*, 2002). Plusieurs approches sont utilisées pour vérifier cette hypothèse et consistent généralement à mettre en relation des indices spectraux avec les indices de diversité issus de données de terrain. Une première approche consiste à utiliser la variance d'indices de végétation conventionnels tels que le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et le MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index) pour estimer la diversité. Dans plusieurs cas, le NDVI a montré une certaine corrélation avec la richesse spécifique (Wang & Gamon, 2019). Une autre approche est la détermination et la cartographie de la beta diversité avec l'indice Q de Rao spectral qui peut être généré à partir d'objet spatiaux tels que des rasters d'indices de végétation (Rocchini *et al.*, 2017). Peu de forêts sèches et encore moins de forêts sèches ouest-africaines ont fait l'objet d'études utilisant les données de télédétection open-source pour la prédiction de la diversité des espèces d'arbres en appliquant ces différentes méthodes. Cette étude se positionne comme un cadre de validation de l'HVS pour le suivi, à moindre coût, de la biodiversité des forêts sèches du

Bénin. L'hypothèse de recherche posée est : Les caractéristiques spectrales des capteurs Landsat et Sentinel 2 permettent de prédire la diversité spécifique des arbres avec une précision suffisante pour le suivi des forêts sèche soudanaises du Bénin. L'objectif principal est d'évaluer la capacité de l'imagerie libre d'accès des capteurs multispectraux à caractériser la diversité spécifique des forêts sèches du Bénin selon l'hypothèse de variation spectrale. Pour cela nous avons dans un premier temps évalué les performances des caractéristiques spectrales des capteurs Landsat 8, Landsat 9 et Sentinel 2 à prédire la diversité des espèces d'arbres basée sur la richesse spécifique, l'indice de Shannon et l'indice de Simpson des forêts sèches soudanaises. Par la suite il a été question d'identifier l'indice de végétation le plus adapté à l'estimation de la diversité spécifique des arbres des forêts tropicales sèches soudanaises du Bénin. Enfin avec l'indice Q de Rao appliqué aux données de télédétection, déterminer les facteurs écologiques susceptibles d'influencer la cartographie de la diversité beta des forêts sèches soudanaises du Bénin.

2. Matériel et Méthode

2.1 Zone d'étude

Cette étude s'est déroulée dans le Centre et le Nord du Bénin (Figure 1), précisément entre les longitudes 1°45' et 3°45' Est et les latitudes 8°10' et 11°30' Nord. Du Sud au Nord, le climat est de type soudano-guinéen avec une pluviométrie annuelle allant jusqu'à 1300mm, puis typiquement soudanien avec une pluviométrie descendant jusqu'à 900mm. Les formations végétales naturelles sont fortement dégradées, favorisant la prédominance de savanes parsemées çà et là d'îlots de forêts sèches (Adomou, 2005 ; Hountondji *et al.*, 2013 ; Ahononga *et al.*, 2020).

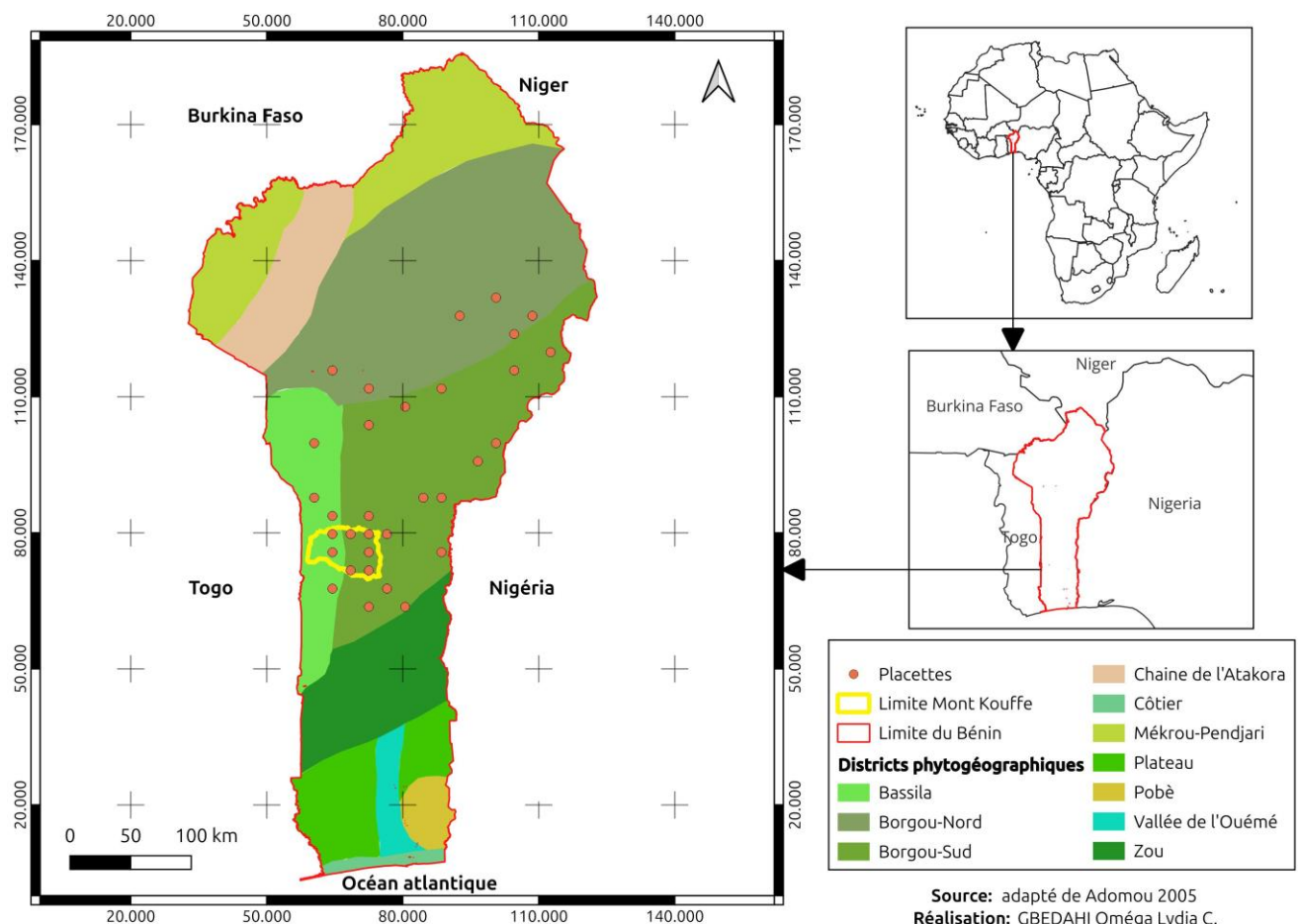


Figure 1. Carte de la zone d'étude, adaptée de Adomou (2005)

2.2 Données de terrain

Les données de terrain utilisées sont extraites de la base de données constituée lors de l'Inventaire forestier National 2 (IFN 2) du Bénin en 2022. Il s'agit d'un inventaire, selon un dispositif d'échantillonnage systématique. Des placettes circulaires de 18m de rayon ont été installées par grappe selon une grille de 15km X 15Km (Rapport IFN 2, 2022). Chaque grappe est formée de quatre placettes nommée A, B, C et D disposées en un carré de 1Km de côté. Nous avons identifié pour toute la zone d'étude, les placettes installées dans des îlots de forêts sèches. Au total 64 placettes, dont 40 dans la forêt classée de Mont-Kouffè ont été pris en compte. La collecte de données a été faite sur les arbres à Diamètre à Hauteur de poitrine d'Homme (DBH) supérieur à 10 cm. Les données collectées sont le nom de l'espèce, le DBH et les coordonnées géographiques de chaque pied d'arbre. La richesse spécifique (S), l'indice de diversité de Shannon (H') et l'indice de diversité de Simpson (D) ont été calculés par placette selon les formules suivantes :

$$S = N$$

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \times \ln(p_i)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s p_i$$

Avec

p_i : Abondance proportionnelle de la i ème espèce dans la placette,

S : Nombre total de toutes les espèces dans la placette.

ln : Logarithme népérien de l'abondance proportionnelle des espèces dans la placette.

2.3 Données de télédétection :

- *Performance des capteurs Sentinel 2 et Landsat pour l'estimation de la diversité spécifique des forêts tropicales sèches soudanaises du Bénin*

Pour avoir des images sans nuages, l'image sentinel 2A de Mars 2022, Landsat 9 de Février 2022 et Landsat 8 de Février 2023 couvrant la zone d'étude ont été téléchargées. Toutes les images ont été converties en valeurs de réflectance. Pour évaluer la performance des capteurs, seules les bandes 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 8A, 11 et 12 ont été considérées pour Sentinel 2, tandis que les bandes 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 10 ont été prise en compte pour les capteurs Landsat. En effet la bande 8 des images Landsat est panchromatique et les autres bandes délaissées contiennent, selon le cas, les informations sur les aérosols, les nuages et la vapeur d'eau. Les valeurs spectrales des pixels ont été extraites pour chaque pied d'arbre et chacune des bandes retenues.

- *Détermination des facteurs écologiques susceptibles d'influencer la cartographie de la diversité beta des forêts sèches soudanaises*

En général la phénologie des espèces forestières de la zone soudanaise dépend des saisons. Le développement foliaire est à son maximum dans la période de Juillet à Septembre, tandis que la défeuillaison est maximale entre Février et Mars. La floraison atteint son pic entre Avril et mai et la fructification entre Mai et Juillet (Mahamane *et al.*, 2007). Les images des mois d'avril à novembre présentant une forte couverture nuageuse, seules les images de décembre, janvier, février et mars ont été utilisées. Pour cet objectif, les phases de développement foliaire et celle de défeuillaison ont donc été considérées. Les images Sentinel 2 de décembre 2021 et de mars 2022 ont été utilisées pour capter respectivement l'une et l'autre de ces phénomènes.

Sur la base de la classification des bandes spectrales selon leur importance à prédire la diversité spécifique, l'indice de végétation NDMI (Normalized Difference Moisture Index) qui mesure la teneur en eau des feuilles et qui est basée sur les longueurs d'ondes du proche infrarouge B8 et de l'infrarouge à ondes courtes B11 a été utilisé en plus du NDVI et du MSAVI. Les bandes 4, 8 et 11 de Sentinel 2 ont été utilisées pour générer les indices de végétation NDVI, NDMI et MSAVI.

2.4 Analyses de données

- *Performance des capteurs Sentinel 2 et Landsat pour l'estimation de la diversité spécifique des forêts tropicales sèches soudanaises du Bénin*

Les statistiques descriptives de la diversité spécifique basée sur la richesse spécifique, l'indice de diversité de Shannon et l'indice de diversité de Simpson ont été produites avec les données de terrain. L'algorithme d'apprentissage automatique Random Forest

(RF) a été utilisé pour construire des modèles de régression prédictifs de la diversité spécifique avec les valeurs de réflectance extraites. Le RF est d'une grande précision et robuste, même avec des échantillons de taille limitée (Chrysafis *et al.*, 2020). Par la suite, pour évaluer les performances des modèles Landsat 8, Landsat 9 et Sentinel 2, le coefficient de détermination R^2 et l'Erreur quadratique moyenne RMSE (Root Mean Squared Error) ont été calculé pour chacun des modèles.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Avec

y_i : ième variable à prédire,

$\hat{y}_i$: ième prédiction,

$y_i - \hat{y}_i$: les erreurs.

Le modèle ayant le coefficient de détermination le plus élevé et l'erreur quadratique la plus faible étant le plus précis. Enfin, en se basant sur la valeur du pourcentage d'augmentation de l'erreur quadratique moyenne %IncMSE (percentage increase in Mean Squared Error) pour chacun des trois modèles, les bandes spectrales de chaque capteur ont été classées selon leur importance à la prédiction de la diversité.

- **Détermination des facteurs écologiques susceptibles d'influencer la cartographie de la diversité beta des forêts sèches soudanaises à partir de l'imagerie satellitaire libre d'accès.**

Une analyse de corrélation a été faite entre la variance de chaque indice de végétation et la richesse spécifique. L'indice le plus corrélé à la richesse spécifique a été utilisé pour générer les cartes de la diversité beta de la forêt classée de Mont-Kouffé en utilisant l'indice de Rao spectral selon la méthode de Rocchini (2017). Enfin une comparaison des valeurs de Q de Rao spectral des mois de décembre (développement foliaire) et de mars (défeuillaison) a permis d'évaluer l'effet de la phénologie sur l'indice Q de Rao spectral pour la cartographie de la diversité beta des arbres des forêts tropicales sèches soudanaises du Bénin.

3. Résultats

3.1 Evaluation des performances des capteurs Landsat 8, Landsat 9 et Sentinel 2 pour la prédiction de la diversité spécifique des forêts sèches soudanaises

Statistique descriptive de la diversité spécifique des forêts sèches soudanaises du Bénin à partir des données de terrain

Pour chaque placette la richesse spécifique, l'indice de diversité de Shannon et l'indice de diversité de Simpson ont été calculés avec les données de terrain. Les résultats d'analyse des données de terrain informent qu'en moyenne par placette la richesse spécifique est de 10,375, l'indice de diversité de Shannon est de 1,898 tandis que l'indice de diversité de Simpson est 0,783 (Tableau 1).

Tableau 1. Statistique descriptive de la diversité spécifique in situ

Paramètres	Richesse spécifique	Indice de Shannon	Indice de Simpson
Moyenne	10,375	1,898	0,783
Min.	6	1,089	0,507
Max.	19	2,736	0,922
Écart-type	3,149	0,360	0,088

Prédiction de la diversité spécifique par les modèles Landsat 8, Landsat 9 et Sentinel 2

Les statistiques descriptives de la prédiction de la diversité spécifique à partir des données Landsat 8, Landsat 9 et Sentinel 2 sont présentées dans le tableau 2.

Les prédictions obtenues pour les trois capteurs sont légèrement différentes pour la richesse spécifique et l'indice de Shannon tandis qu'elles sont identiques pour l'indice de Simpson. En moyenne la richesse spécifique est de 10,90 avec le modèle Landsat 8 et de 10,86 avec les modèles Landsat 9 et Sentinel 2. L'indice de diversité de Shannon est en moyenne égal à 1,94 ; 1,93 et 1,92 respectivement pour Landsat 8, Landsat 9 et Sentinel 2. La valeur moyenne de l'indice de diversité de Simpson est de 0,79 quel que soit le modèle considéré. Les résultats de la prédiction de la diversité des espèces à l'aide des modèles Landsat 8, Landsat 9 et Sentinel 2 sont illustrés dans les figures 2, 3 et 4.

Tableau 2. Statistiques descriptives de la prédiction de la diversité spécifique sous Landsat 8, Landsat 9 et Sentinel 2A

Capteurs		Richesse spécifique	Indice de Shannon	Indice de Simpson
Landsat 8	Moyenne	10.90	1.94	0.79
	Min.	6.00	1.09	0.51
	Max.	19.00	2.74	0.92
	Écart-type	3.11	0.35	0.08
Landsat 9	Moyenne	10.86	1.93	0.79
	Min.	6.00	1.09	0.51
	Max.	19.00	2.74	0.92
	Écart-type	3.07	0.35	0.08
Sentinel 2A	Moyenne	10.86	1.92	0.79
	Min.	6.03	1.09	0.51
	Max.	19.00	2.74	0.92
	Écart-type	3.01	0.34	0.08

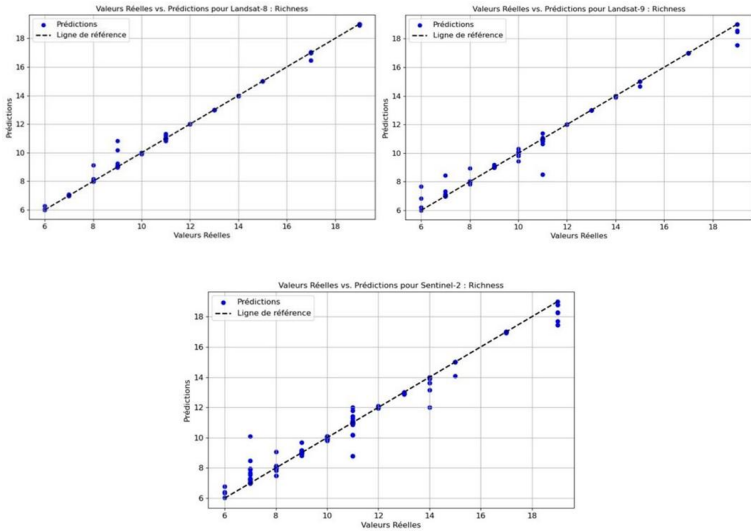


Figure 2. Prédiction de la richesse spécifique pour les modèles Landsat 8, Landsat 9 et Sentinel 2

Evaluation des performances des capteurs Landsat 8, Landsat 9 et Sentinel 2A

Les résultats d’évaluation des performances des modèles de prédiction Landsat 8, Landsat 9 et Sentinel 2A de la diversité spécifique des forêts tropicales sèches basée sur la richesse spécifique, l’indice de Shannon et l’indice de Simpson montrent que tous les modèles ont une précision de plus de 90% quel que soit le capteur et l’indicateur de biodiversité considéré. Néanmoins le modèle Landsat 8 a produit la plus grande précision avec pour la richesse spécifique, un coefficient de détermination de 0,997 et un RMSE de 0,18, pour l’indice de Shannon un coefficient de détermination de 0,998 et un RMSE de 0,015 et pour l’indice de Simpson un coefficient de détermination de 0,999 et un RMSE de 0,003.

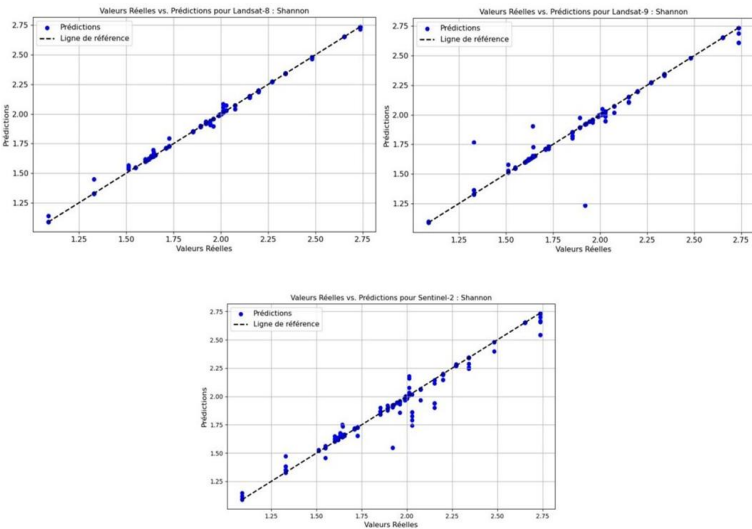


Figure 3. Prédiction de l’indice de diversité de Shannon pour les modèles Landsat 8, Landsat 9 et Sentinel 2

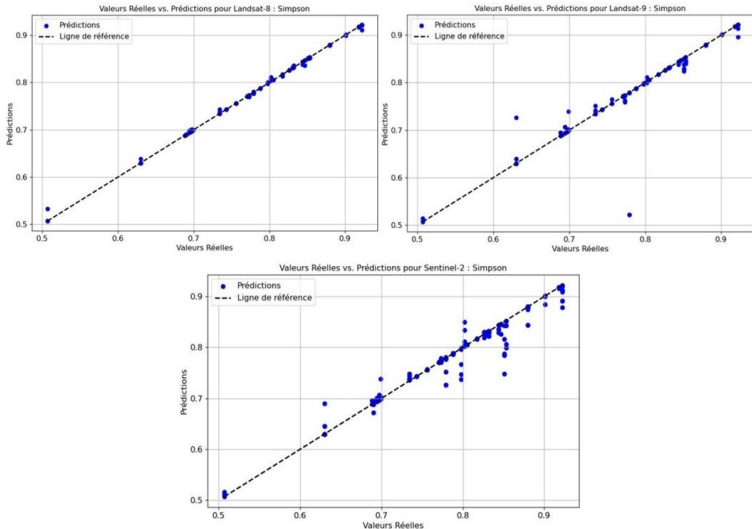


Figure 4. Prédiction de l’indice de diversité de Simpson pour les modèles Landsat 8, Landsat 9 et Sentinel 2

Tableau 3. Evaluation des modèles de prédiction de la diversité

Capteur	Richesse spécifique		Shannon Index		Simpson Index	
	R²	RMSE	R²	RMSE	R²	RMSE
Landsat 8	0.997	0.180	0.998	0.015	0.999	0.003
Landsat 9	0.989	0.335	0.952	0.076	0.901	0.026
Sentinel 2A	0.979	0.453	0.963	0.067	0.955	0.018

Détermination de la contribution des bandes à la prédiction de la diversité

Les résultats relatifs à l’importance des bandes sont présentés dans les tableaux 4, 5 et 6. Pour le modèle Landsat 8, les bandes 5 et 2 sont les plus importantes pour la prédiction de la richesse spécifique. Les bandes 2 et 10 sont les plus importantes pour prédire les indices de diversité de Shannon et de Simpson. En ce qui concerne le modèle Landsat 9, les bandes les plus importantes sont plutôt les bandes 3 et 5 pour la richesse spécifique, la bande 10 suivie de la bande

5 pour l'indice de Shannon et de la bande 2 pour l'indice de Simpson. Enfin pour le modèle Sentinel 2, les bandes 2 et 7 pour prédire la richesse spécifique. La bande 12 est plus importante pour prédire les indices de Shannon et de Simpson. Pour ces deux indices, elle est suivie respectivement de la bande 4 et de la bande 11.

Tableau 4. Classement des bandes Landsat 8 importantes pour la prédiction de la diversité

Richness		Shannon Index		Simpson Index	
Bands	%MSE	Band	%MSE	Band	%MSE
B5	0.318	B2	0.275	B2	0.321
B2	0.317	B10	0.224	B10	0.309
B6	0.145	B6	0.192	B3	0.136
B10	0.135	B5	0.174	B6	0.122
B3	0.082	B4	0.133	B7	0.110

Tableau 5. Classement des bandes Landsat 9 importantes pour la prédiction de la diversité

Richness		Shannon Index		Simpson Index	
Bands	%MSE	Band	%MSE	Band	%MSE
B3	0.385	B10	0.389	B10	0.499
B5	0.199	B5	0.170	B2	0.213
B2	0.150	B7	0.159	B7	0.109
B4	0.143	B2	0.143	B3	0.095
B10	0.121	B4	0.136	B5	0.083

Tableau 6. Classement des bandes Sentinel 2 importantes pour la prédiction de la diversité

Richness		Shannon Index		Simpson Index	
Bands	%MSE	Band	%MSE	Band	%MSE
B2	0.331	B12	0.281	B12	0.355
B7	0.231	B4	0.208	B11	0.206
B11	0.163	B7	0.198	B7	0.171
B12	0.152	B11	0.159	B5	0.150
B8A	0.120	B6	0.151	B2	0.116

3.2 Détermination des facteurs écologiques susceptibles d'influencer la cartographie de la diversité beta des forêts sèches soudanaises à partir de l'imagerie satellitaire libre d'accès

Choix de l'indice de végétation pour la cartographie de la diversité beta par l'indice Q de Rao spectral

Les résultats de l'analyse de corrélation entre la variance des indices de végétation et la richesse spécifique montre qu'une corrélation négative significative est observée entre la variance des indices NDVI et MSAVI. Néanmoins, la variance du NDVI présente la meilleure corrélation ($r = 0,41$; $p = 0,02$) avec la richesse spécifique des forêts tropicales sèches de la zone soudanaise du Bénin (Tableau 7).

Tableau 7. Corrélation entre les variances des indices de végétation NDVI, MSAVI et NDMI et la richesse spécifique

Variables	Paramètres	
Variance NDVI – Richesse spécifique	$r = -0,41$	$p = 0,02$
Variance MSAVI – Richesse spécifique	$r = -0,36$	$p = 0,04$
Variance NDMI – Richesse spécifique	$r = -0,10$	$p = 0,58$

Facteurs écologiques susceptibles d'influencer la cartographie de la diversité beta des forêts sèches soudanaises à partir de l'imagerie satellitaire libre d'accès

La forêt classée de mont-kouffè a particulièrement servi de zone d'étude pour étudier l'effet de la phénologie sur l'indice Q de Rao spectral basé sur le NDVI (Qndvi) des forêts sèches soudanaises du Bénin. Globalement le Qndvi est plus élevée (0 à 5) pendant la période de développement foliaire comparativement à la période de défeuillaison (0 à 4) (figure 5). Pour les deux périodes, les formations forestières denses sont caractérisées par des valeurs faibles de Qndvi tandis que la diversité est plus

élevée dans les formations clairsemées. Ceci suggère un effet de la densité du couvert végétal sur l'estimation de la diversité beta des forêts soudanaises par l'indice Q de Rao spectral.

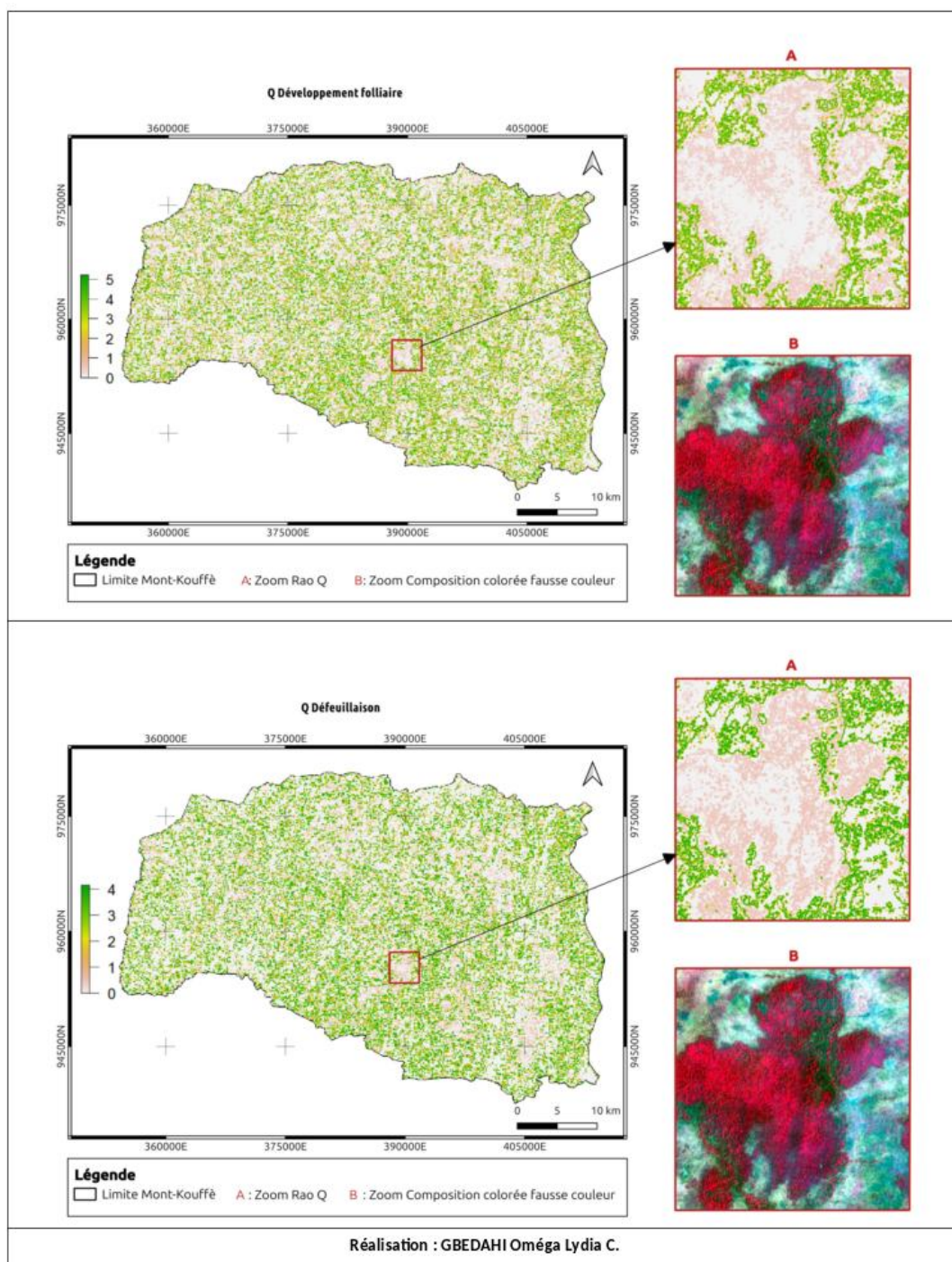


Figure 5 : Variation du Q de Rao spectral des forêts sèches selon la phénologie et la densité du couvert végétal

Par ailleurs, les résultats montrent aussi que pour les forêts denses, la diversité est légèrement sous-estimée dans la période de développement foliaire comparativement à la période de défeuillaison. Néanmoins les résultats de l'analyse de variance effectuée à partir des valeurs du Qndvi calculé selon Rochini (2017), pour la forêt classée de Mont-Koufè montrent que la phénologie n'a pas d'effet significatif sur l'indice Q spectral (Tableau 8).

Tableau 8. Analyse de variance de l'effet de la phénologie sur le Q spectral

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	p value
Phénophase	1	0,0143	0,01425	0,897	0,34
Résiduels	78	1,2396	0,01589		

4. Discussion

4.1 Evaluation des performances des capteurs Landsat 8, Landsat 9 et Sentinel 2A

Les dernières avancées en utilisation de la télédétection pour la conservation de la biodiversité révèlent un fort potentiel de l'imagerie satellitaire pour le monitoring de la biodiversité des forêts tropicales (Wang & Gamon, 2019 ; Pettoirelli *et al.*, 2014). Cette étude a montré que pour la prédiction de la diversité spécifique des forêts sèches soudanaises du Bénin, les capteurs Landsat 8, Landsat 9 et Sentinel 2 ont tous fournis des précisions de plus de 90% bien qu'ils soient de résolutions diverses. Ceci va à l'encontre des résultats de plusieurs études selon lesquelles les images Sentinel 2 ont été identifiées comme étant plus performantes à prédire la diversité des espèces forestières (Torresani *et al.*, 2019 ; Gyamfi-Ampadu *et al.*, 2021). De plus les performances atteintes par les différents capteurs dépassent les performances atteintes dans les études antérieures. En effet, pour la prédiction de la diversité spécifique, Torresani *et al.*, (2019) ont obtenu des coefficients de détermination de 0,70 pour Sentinel 2 et 0,42 pour Landsat 8. Gyamfi-Ampadu *et al.*, (2021) ont obtenu un coefficient de détermination de 0,92 pour Sentinel 2 contre 0,52 pour Landsat 8. Plusieurs explications peuvent être avancées. D'abord la précision très élevée de prédiction généralement observée dans la présente étude peut être liée à la période de collecte des images satellitaire correspondant à la saison sèche. Pendant ces mois de grande sécheresse, le tapis graminéen est inexistant et les juvéniles sont complètement asséchés, les arbres et les arbustes de diamètre à hauteur de poitrine d'homme supérieur à 10cm considéré dans cette étude sont donc plus précisément télédétektés. Ensuite, une résolution spatiale plus grande entraîne une probabilité plus élevée de capter entièrement chaque pied d'arbre et plus d'informations sur la structure des communautés végétales (Marceau *et al.*, 1994 ; Nagendra *et al.*, 2010 ; Bolyn *et al.*, 2018). Ainsi la résolution spatiale de l'image Landsat 8 plus grande que celle de Sentinel 2 aurait aussi favorisé la précision plus élevée constatée du modèle Landat 8. Mallinis *et al.*, (2020) ont aussi trouvé que pour le parc national du Nord du Pinde en Grèce, les images de résolution moyenne de Landsat 8 et de Sentinel 2 produisent des modèles plus précis de prédiction de la diversité des espèces comparativement aux images de haute résolution RapidEye.

4.2 Détermination de la contribution des bandes à la prédiction de la diversité

Avec les modèles Landsat 8 et Landsat 9, les bandes du domaine du visible B2 et B3, du proche infrarouge B5 et de l'infrarouge thermique B10 sont les plus importantes pour prédire la diversité spécifique des forêts tropicales sèches de notre zone d'étude. Ces résultats sont en adéquation avec ceux de Ardö *et al.* (1992), Mallinis *et al.* (2004), Nagendra *et al.* (2010), et Mallinis *et al.*, (2020) qui ont tous identifiés les bandes du visibles en général et plus particulièrement la bande bleu (B2), comme fournissant des informations cruciales sur la caractérisation structurale des forêts. En ce qui concerne la bande B5, elle est reconnue pour différencier la végétation (Rocchini *et al.*, 2007 ; Chrysafis *et al.*, 2019). Enfin Ma *et al.* (2019) sont aussi parvenus à la conclusion que les bandes infrarouge sont importantes pour prédire la diversité fonctionnelle des forêts. L'effet combiné de la densité relativement faible des arbres, les températures élevées caractéristiques de la période de collecte des données et le fait de n'avoir considéré que les individus à DBH supérieur à 10cm est une explication très probable de la grande précision de prédiction de la diversité des espèces remarquée dans cette présente étude.

4.3 Détermination des facteurs écologiques susceptibles d'influencer la cartographie de la diversité beta des forêts sèches soudanaises à partir de l'imagerie satellitaire libre d'accès

En ce qui concerne la cartographie de la diversité beta, nos résultats montrant globalement des valeurs plus élevées de Q pendant la période de développement foliaire peuvent être expliqué par le fait qu'il y a une meilleure démarcation spectrale entre les espèces d'arbre dû aux différences dans les traits foliaires des espèces (Hill *et al.*, 2010; Chrysafis *et al.*, 2020). Cette explication est d'autant plus plausible que les diversités les plus élevées ont été retrouvées dans les formations végétales clairsemées caractérisées par une meilleure individualisation des pieds d'arbres. Ces résultats sont dans le même ordre d'idées que ceux de Pangtey *et al.* (2023). En effet ces auteurs ont montré que le taux de détermination de la diversité par le Q de Rao est plus élevé en début

de saison de croissance du fait de la grande variation de la phénologie entre les espèces d’arbres au cours de cette période. Par ailleurs cette étude a montré des valeurs faibles du Q de Rao basé sur le NDVI au niveau des formations forestières les plus denses quelle que soit la phase phénologique considérée. L’explication proposée est que dans ce type de formations, la canopée est constituée essentiellement de la cime des arbres dominants. Les signatures spectrales télédétectées sont donc celles des cimes des arbres dominants, les arbres des étages inférieurs étant cachés par ceux-ci. Pangtey *et al.* (2023) en sont venu à la même conclusion. Arekhi *et al.* (2017); Torresani *et al.* (2019) et Pangtey *et al.* (2023) ont identifié la période d’initiation des feuilles comme la période où sont observées les meilleures corrélations entre la diversité spectrale et la diversité des espèces, tandis qu’aucune corrélation n’est observée pendant la période de défeuillaison. Ceci pourrait expliquer l’absence d’effet significatif de la phénologie sur le Q spectral que nous avons observé dans la présente étude. En effet l’étude a considérée deux périodes, celle du développement foliaire et celle de la défeuillaison. De plus pour des raisons de couvertures nuageuses, l’image satellite utilisée pour la période de développement foliaire est celle du mois de décembre. Dans la zone soudanaise, le développement foliaire atteint son pic dans la période allant de juillet à septembre (Mahamane *et al.*, 2007). La phase d’initiation foliaire se déroule donc bien avant.

4.4 Implication pour la recherche

Une difficulté importante de l’utilisation de l’indice Q de Rao spectral pour l’évaluation et la cartographie de la diversité beta des forêts tropicales sèches serait donc la couverture nuageuse sur les images satellites pendant la période pluvieuse. Des techniques sont proposées pour surmonter cette difficulté. L’une d’entre elles est l’utilisation de l’outil “ImageTimeSerieGapFilling” du logiciel Orfeo ToolBox (Inglada, 2016) qui permet de remplacer les pixels couverts par les nuages d’une série temporelle par une interpolation utilisant les dates valides de la série.

5. Conclusion

Cette étude a montré que les images produites par les capteurs Landat 8, Landsat 9 et Sentinel 2 peuvent servir à prédire avec une précision élevée la diversité spécifique des grands arbres (DBH supérieur à 10cm) des forêts sèches soudaniennes du Bénin. Les longueurs d’ondes du visible (B2, B3), du proche infrarouge (B5) et de l’infrarouge thermique (B10) sont les plus importantes des modèles Landsat 8 et Landsat 9, et celles du visible (B2) et de l’infrarouge à ondes courtes (B11, B12) sont les plus importantes pour prédire la diversité de ces forêts. L’indice Q de Rao spectral basé sur le NDVI permet de cartographier la diversité beta des forêts sèches soudaniennes. Bien qu’un effet significatif de la phénologie sur le Q spectral n’ait pas été déterminé dans la présente étude, des variations ont quand même été observées d’un stade phénologique à un autre. De plus, nos résultats suggèrent un effet de la densité du couvert végétal sur le Q spectral. Cette étude confirme l’opportunité de l’imagerie satellitaire libre d’accès pour le monitoring de la biodiversité forestière végétale en milieu tropical sec. Des études sur l’impact de la densité de la végétation, de la saison ou en encore des technologies d’obtention d’images de meilleure qualité doivent être effectuées pour mieux appréhender ce potentiel.

Remerciement

Les auteurs déclarent ne pas avoir reçu de fonds, de subventions ou d'autres formes de soutien au cours de la préparation de cet manuscrit.

Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	Oméga Lydia Clarisse GBEDAHI
Gestion des données	Oméga Lydia Clarisse GBEDAHI
Analyse formelle	Oméga Lydia Clarisse GBEDAHI, Sabi Bruno BIO NIKKI SARE
Méthodologie	Oméga Lydia Clarisse GBEDAHI, Sabi Bruno BIO NIKKI SARE, Samadori Sorotori Honoré BIAOU
Supervision Validation	Samadori Sorotori Honoré BIAOU
Écriture – Préparation	Oméga Lydia Clarisse GBEDAHI
Écriture – Révision	Oméga Lydia Clarisse GBEDAHI

Références

- Adomou A.C., 2005. Vegetation patterns and environmental gradients in Benin: implications for biogeography and conservation. Wageningen University and Research, Wageningen.
- Ahononga F.C., Gouwakinnou G.N., Biao S.S.H., Biao S., 2020. Vulnérabilité des terres des écosystèmes du domaine soudanien au Bénin de 1995 à 2015. *Bois for. trop* 346 : 35-50. <https://doi.org/10.19182/bft2020.346.a36295>
- Ardö J., 1992. Volume quantification of coniferous forest compartments using spectral radiance recorded by Landsat Thematic Mapper. *International Journal of Remote Sensing*, 13(9), 1779-1786. <https://doi.org/10.1080/01431169208904227>
- Arekhi M., Yilmaz O.Y., Yilmaz H., Akyüz Y.F., 2017. Can tree species diversity be assessed with Landsat data in a temperate forest?. *Environmental monitoring and assessment*, 189, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6295-6>
- Assédé E.S.P., Azihou A.F., Geldenhuys C.J., Chirwa P.W., Biao S.S.H., 2020. Sudanian versus Zambebian woodlands of Africa: Composition, ecology, biogeography and use. *Acta oecologica* 107 : 103599. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2020.103599>
- Bolyn C., Michez A., Gaucher P., Lejeune P., Bonnet S., 2018. Forest mapping and species composition using supervised per pixel classification of Sentinel-2 imagery. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 22 : 3. DOI : [10.25518/1780-4507.16524](https://doi.org/10.25518/1780-4507.16524)
- Ceperley N., Montagnini F., Natta A.K., 2010. Importance des sites sacrés pour la conservation des forêts-galeries au centre-Benin. *Bois for. trop* 303 : 5-23. <https://doi.org/10.19182/bft2010.303.a20450>
- Chrysafis I., Mallinis G., Korakis G., Dragozi E., 2019. Forest diversity estimation using Sentinel-2 and RapidEye imagery: A case study of the Northern Pindos National Park. In : *Seventh International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment* (2019). SPIE 11174 : 50-58. <https://doi.org/10.1117/12.2533661>
- Chrysafis I., Korakis G., Kyriazopoulos A.P., Mallinis G., 2020. Predicting tree species diversity using geodiversity and Sentinel-2 multi-seasonal spectral information. *Sustainability* 12(21) : 9250. <https://doi.org/10.3390/su12219250>
- Dixon D.J., Callow J.N., Duncan J.M., Setterfield S.A., Pauli N., 2021. Satellite prediction of forest flowering phenology. *Remote Sensing of Environment* 255 : 112197. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112197>
- Gyamfi-Ampadu E., Gebreslasie M., Mendoza-Ponce A., 2021. Evaluating multi-sensors spectral and spatial resolutions for tree species diversity prediction. *Remote Sensing* 13(5) : 1033. <https://doi.org/10.3390/rs13051033>
- Hill R.A., Wilson A.K., George M., Hinsley S.A., 2010. Mapping tree species in temperate deciduous woodland using time-series multi-spectral data. *Applied Vegetation Science*, 13(1), 86-99. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2009.01053.x>
- Hountondji Y.C., Gaoué O.G., Sokpon N., Ozer P., 2013. Analyse écogéographique de la fragmentation du couvert végétal au nord Bénin: paramètres dendrométriques et phytoécologiques comme indicateurs in situ de la dégradation des peuplements ligneux. *Geo-Eco-Trop: Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Écologie Tropicales*, 37(1). <https://hdl.handle.net/2268/163267>
- Inglada J., 2016. OTB Gapfilling, a Temporal Gapfilling for Image Time Series Library. <https://doi.org/10.5281/zenodo.45572>
- Issiaka N.T., Arouna O., Imorou I.T. 2016. Cartographie de la dynamique spatio-temporelle des parcours Naturels des troupeaux transhumants dans les Communes de Banikoara et de Karimama au Bénin (Afrique de l'ouest). *European Scientific Journal* 12(32) : 251-268. <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n32p251>
- Ma X., Mahecha M.D., Migliavacca M., et al., 2019. Inferring plant functional diversity from space: the potential of Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment* 233 : 111368. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111368>
- Mahamane A., Mahamane S., Lejoly J., 2007. Phénologie de quelques espèces ligneuses du Parc national du «W» du Niger. *Sécheresse*, 18(4), 354-358. <https://doi.org/10.1684/sec.2007.0189>
- Maïga Yaya, Bouda Tiraogo Prince Florian, Bamogo Mahamoudou, Yanogo Pawendkissou Isidore, Somé Yélézouomin Stéphane Corentin (2023). La dynamique des structures spatiales dans la commune rurale de Sourgou (Burkina Faso) : une analyse à partir des indices écologiques. *Rev Ecosystèmes et Paysages (Togo)*, 03(1): 1 –15, e-ISSN (Online): 2790-3230 doi: <https://doi.org/10.59384/recopays2023-3-1>
- Mallinis G., Koutsias N., Makras A., Karteris M., 2004. Forest parameters estimation in a European Mediterranean landscape using remotely sensed data. *Forest Science*, 50(4), 450-460. <https://doi.org/10.1093/forestscience/50.4.450>
- Mallinis G., Chrysafis I., Korakis G., Pana E., Kyriazopoulos A.P., 2020. A random forest modelling procedure for a multi-sensor assessment of tree species diversity. *Remote Sensing* 12(7) : 1210. <https://doi.org/10.3390/rs12071210>
- Marceau D.J., Gratton D.J., Fournier R.A., Fortin J.P., 1994. Remote sensing and the measurement of geographical entities in a forested environment. 2. The optimal spatial resolution. *Remote Sensing of Environment* 49(2) : 105-117. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90047-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90047-7)

- Mensah Kossi, Folega Fousséni, Woegan Yao Agbelessissi, Atakpama Wouyo, Pereki Hodabalo, Wala Kperkouma, Akpagana Koffi (2022) Etat et dynamique spatio-temporelle de la forêt communautaire d'Edouwossi-Copé, Région des Plateaux-Togo. *Rev Ecosystèmes et Paysages (Togo)*, 2022, N° 01, vol 02; 12-26pp; e-ISSN (Online): 2790-3230; DOI: <https://doi.org/10.59384/recopays.tg2102>.
- Nagendra H., Rocchini D., Ghate R., Sharma B., Pareeth S., 2010. Assessing plant diversity in a dry tropical forest: Comparing the utility of Landsat and IKONOS satellite images. *Remote sensing* 2(2) : 478-496. <https://doi.org/10.3390/rs2020478>
- Nasiri V., Beloiu M., Darvishsefat A.A., Griess V.C., Maftai C., Waser L.T., 2023. Mapping tree species composition in a Caspian temperate mixed forest based on spectral-temporal metrics and machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 116 : 103154. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103154>
- Natta A.K., 2003. Ecological assessment of riparian forests in Benin. Wageningen University and Research, Wageningen.
- Noufe Francis, Yameogo Joséphine, Ouoba Paulin, Somda Irénée (2023). Analyse des facteurs influençant la dynamique des ligneux dans la forêt classée de Kuinima en zone périurbaine dans l'ouest du Burkina Faso. *Rev Écosystèmes et Paysages (Togo)*, 03(1): 32–47, e-ISSN (Online): 2790-3230 doi: <https://doi.org/10.59384/recopays2023-3-1>
- Palmer, M. W., Earls, P. G., Hoagland, B. W., White, P. S., & Wohlgemuth, T. (2002). Quantitative tools for perfecting species lists. *Environmetrics: The official journal of the International Environmetrics Society*, 13(2), 121-137. <https://doi.org/10.1002/env.516>
- Pangtey D., Padalia H., Bodh R., Rai I.D., Nandy S., 2023. Application of remote sensing-based spectral variability hypothesis to improve tree diversity estimation of seasonal tropical forest considering phenological variations. *Geocarto International*, 38(1), 2178525. <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2178525>
- Pettorelli N., Nagendra H., Williams R., Rocchini D., Fleishman E., 2014. A new platform to support research at the interface of remote sensing, ecology and conservation. *Remote sens. ecol. conserv.* 1(1) : 1-3. <https://dx.doi.org/10.1002/rse2.1>
- Rampheri M., Dube T., Dhau I., 2020. Use of remotely sensed data to estimate tree species diversity as an indicator of biodiversity in Blouberg Nature Reserve, South Africa. *Geocarto int.* 37(2) : 526-542. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1723717>
- Rocchini D., Ricotta C., Chiarucci A., 2007. Using satellite imagery to assess plant species richness: The role of multispectral systems. *Applied Vegetation Science* 10(3) : 325-331. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2007.tb00431.x>
- Rocchini D., Marcantonio M., Ricotta C., 2017. Measuring Rao's Q diversity index from remote sensing: An open source solution. *Ecological indicators*, 72, 234-238. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.039>
- Sambiani Dambénoa, Kanda Madjouma, Atato Abalo, Folega Fousseni, Wala Kperkouma, Akpagana Koffi (2023). Cartographie et caractérisation écologique des formations végétales à épiphytes du socle Eburnéen au Togo. *Rev Écosystèmes et Paysages (Togo)*, 3(2) : 1–12, e-ISSN (Online) : 2790-3230 DOI : <https://doi.org/10.59384/recopays.tg3218>
- Torresani M., Rocchini D., Sonnenschein R., *et al.*, 2019. Estimating tree species diversity from space in an alpine conifer forest: The Rao's Q diversity index meets the spectral variation hypothesis. *Ecological Informatics* 52 : 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2019.04.001>
- Turner W., Rondinini C., Pettorelli N., *et al.*, (2015) Free and open-access satellite data are key to biodiversity conservation. *Biological Conservation* 182 : 173-176. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.11.048>
- Vodouhê G.F., Coulibaly O., Sinsin B., 2009. Estimating local values of vegetable non-timber forest products to Pendjari Biosphere Reserve dwellers in Benin. In : Parrotta JA, Oteng-Yeboah A, Cobbinah J (2009) Traditional forest-related knowledge and sustainable forest management in Africa. International Union of Forestry Research Organizations World Series 23 : 63-72.
- Vodouhê F.G., Adégbidi A., Coulibaly O., Sinsin B., 2011. *Parkia biglobosa* (Jacq.) R. Br. ex Benth. harvesting as a tool for conservation and source of income for local people in Pendjari Biosphere Reserve. *Acta botanica gallica* 158(4) : 595-608. <https://doi.org/10.1080/12538078.2011.10516297>
- Wang R., Gamon J.A., 2019. Remote sensing of terrestrial plant biodiversity. *Remote Sensing of Environment* 231 : 111218. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111218>