

Analyse De La Dynamique De La Végétation Du Burkina Faso Par Utilisation De Séries Temporelles d'Images FAPAR [Analysis Of The Vegetation Dynamics Of Burkina Faso Using Time Series Of FAPAR Images]

Yélézouomin Stéphane Corentin SOMÉ¹, Alimata ZOROM², Wièmè SOMÉ³, Pounyala Awa Ouoba⁴

¹Département de Géographie, Unité de Formation et de Recherche en Lettres et Sciences Humaines, Université
Norbert ZONGO, Koudougou, Burkina Faso

Laboratoire de Recherche en Sciences Humaines et Sociales (LABOSHS), Université Norbert ZONGO, Koudougou,
Burkina Faso

Laboratoire Dynamique des espaces et sociétés (LDES), Université Joseph KI ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso
KOUDOUGOU, BURKINA FASO

Email : some_y@yahoo.fr

²Département de Géographie, Unité de Formation et de Recherche en Lettres et Sciences Humaines, Université
Norbert ZONGO, Koudougou, Burkina Faso

KOUDOUGOU, BURKINA FASO

Email : alimatazorom@gmail.com

³Secrétariat Permanent en charge de la gestion des Crises et Vulnérabilités en Élevage
Ministère des Ressources Animales et Halieutiques

OUAGADOUGOU, BURKINA FASO

Email : wiemesome@gmail.com

⁴Département de Géographie, Unité de Formation et de Recherche en Lettres et Sciences Humaines Université Joseph
KI ZERBO

Laboratoire Dynamique des espaces et sociétés (LDES), Université Joseph KI ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso

Laboratoire de Recherche en Sciences Humaines et Sociales (LABOSHS), Université Norbert ZONGO, Koudougou,
Burkina Faso

OUAGADOUGOU, BURKINA FASO

Email : mpounyala@gmail.com



Résumé – La dynamique de la végétation des secteurs phytogéographiques est un paramètre clé pour la gestion durable des ressources végétales au Burkina Faso. Cette étude vise à mettre en évidence les changements affectant la productivité de la végétation au Burkina Faso sur la période 1999-2019. Les métriques de la phénologie de la végétation dont la valeur du maximum (V_{mx}) et la valeur moyenne (V_{av}) ont été extraites sur une série temporelle d'images FAPAR pour le calcul des variables statistiques. Les variables statistiques utilisées pour l'appréciation globale du changement de la production de la végétation sont le coefficient de variation, la pente des droites de tendance et l'anomalie standardisée (Z -score). Les résultats indiquent que de forts gains de la productivité de la végétation ont été observés dans le domaine sahélien et le secteur nord-soudanien. Cela est lié à l'expansion des zones de cultures et à une faible persistance des années de déficit de la production végétale sur la période de la nouvelle normale de précipitation (1991-2020).

Cependant, le secteur sud-soudanien marqué par des formations ligneuses abondantes a enregistré de faibles gains de la production de la végétation. La cartographie utilisant les métriques du maximum et de la moyenne donne une tendance globale, mais ne fournit pas assez de détail sur le changement affectant les différentes bandes de végétation. Une combinaison des métriques phénologiques de la végétation au moyen de modèle construit sur la base de biomasse végétale collectée sur le terrain pourrait améliorer ces résultats de la cartographie de zones de changement des secteurs phytogéographiques.

Mots clés – Burkina Faso, secteurs phytogéographiques, dynamique de la végétation, FAPAR

Abstract – The vegetation dynamics of the phytogeographical areas is a key parameter for the sustainable management of plant resources in Burkina Faso. This study aims to highlight the changes affecting vegetation productivity in Burkina Faso over the period 1999-2019. Vegetation phenology metrics whose maximum value (V_{mx}) and mean value (V_{av}) were extracted over a time series of FAPAR images for the calculation of statistical variables. The statistical variables used for the overall assessment of the change in vegetation production are the coefficient of variation, the slope of trend lines and the standardised anomaly (Z -score). The results indicate that strong gains in vegetation productivity have been observed in the Sahelian and North Sudanese areas. This is related to the expansion of crop areas and the low persistence of years of crop production deficit over the period of the new precipitation normal (1991-2020). However, the South Sudanese sector with abundant woody formations recorded small gains in vegetation production. Mapping using metrics of maximum and mean gives an overall trend, but does not provide enough detail on the change affecting different vegetation bands. A combination of phenological vegetation metrics using a model built on the basis of field-collected plant biomass could improve these results in mapping areas of change in the phytogeographic areas.

Keywords – Burkina Faso, phytogeographic area, vegetation dynamic, FAPAR.

I. INTRODUCTION

La réduction du couvert végétal est l'une des conséquences de la forte variabilité négative des précipitations et de l'activité humaine [1], [2]. Le cycle végétatif est étroitement lié à la pluviométrie [3]. Dans les régions arides, le cycle phénologique de la végétation dépend de la qualité des précipitations dans le temps et l'espace [3]. Plusieurs études ont été faites dans le passé sur la dynamique de la végétation dont le NDVI a été le plus utilisé pour le suivi et l'évaluation de la biomasse végétale [4], [5], [2]. Le NDVI a été largement utilisé comme un indicateur de suivi de la sécheresse [6]. Il est un indicateur qui traduit la réflectance de la lumière solaire par les plantes chlorophylliennes et sature dans les zones où la couverture végétale est très dense [7]. Il est influencé par la réflectance des sols nus et peut présenter des problèmes d'interprétations quand les résultats sont extrapolés à des zones non homogènes [6], [8]. Le NDVI fonctionne mieux en saisons de pluies en zone sahélienne au moment où les plantes n'ont pas atteint leur croissance maximale [9]. C'est compte tenu de ces limites que la fraction de rayonnement photosynthétiquement actif absorbée (FAPAR : Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) a été développée pour mieux cerner la productivité et les rendements des zones de végétation très dense [10]. Le produit FAPAR correspond à une bonne estimation de la structure architecturale de la canopée des plantes vertes [11]. Il joue un rôle précis dans l'efficacité d'utilisation de la lumière solaire par la végétation et permet d'évaluer le statut et l'état de santé de la végétation [10]. L'objectif de cette étude est de caractériser la dynamique spatiotemporelle de la végétation au Burkina Faso à l'aide des métriques statistiques extraites sur des séries temporelles d'images FAPAR. Plus spécifiquement, il s'agit de : i) identifier les zones de forte variabilité de la production de la végétation, ii) déterminer la tendance d'évolution de la production de la végétation, iii) de localiser les zones à persistance de déficit et d'abondance de la production de la végétation sur la période 1999 à 2019.

II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Domaines phytogéographiques du Burkina

Le Burkina Faso est situé en Afrique de l'Ouest et traversé par deux bandes climatiques, dont la Sahélienne et la Soudanienne. Les zones phytogéographiques sont le reflet des divisions climatiques existant au Burkina (Figure 1). La végétation du Burkina relève de deux domaines climatiques : sahélien et soudanien. Ces deux domaines se divisent chacun en deux secteurs à savoir le secteur nord-sahélien, sud-sahélien, nord-soudanien et sud-soudanien [12]. La formation végétale dominante dans le domaine sahélien est la steppe arbustive et la savane pour le domaine soudanien. Dans le secteur nord-soudanien, la savane arborée à arbustive est mieux représentée avec 28,11 % du territoire occupé [13]. La savane arborée à arbustive et boisée est mieux

représentée dans le secteur sud-soudanien avec 16,24 % du territoire couvert [13]. Au niveau de la végétation ligneuse, les densités des pieds à l'hectare sont estimées à 174,87 pour le secteur sud-soudanien, 94,51 pour le Nord soudanien, 54,08 pour le Sud sahélien et 31,82 pour le secteur nord-sahélien [13]. Les températures varient entre 16 °C et 45 °C et les précipitations annuelles de 450 à l'extrême nord et 1200 mm à l'extrême sud-ouest [14]. Sur une superficie de 274 200 km², la population totale du Burkina est estimée à 20 487 979 habitants [15]. Les villes des chefs-lieux de régions ont les plus fortes densités humaines. La Figure 1 présente les secteurs phytogéographiques et la population totale des chefs-lieux des régions.

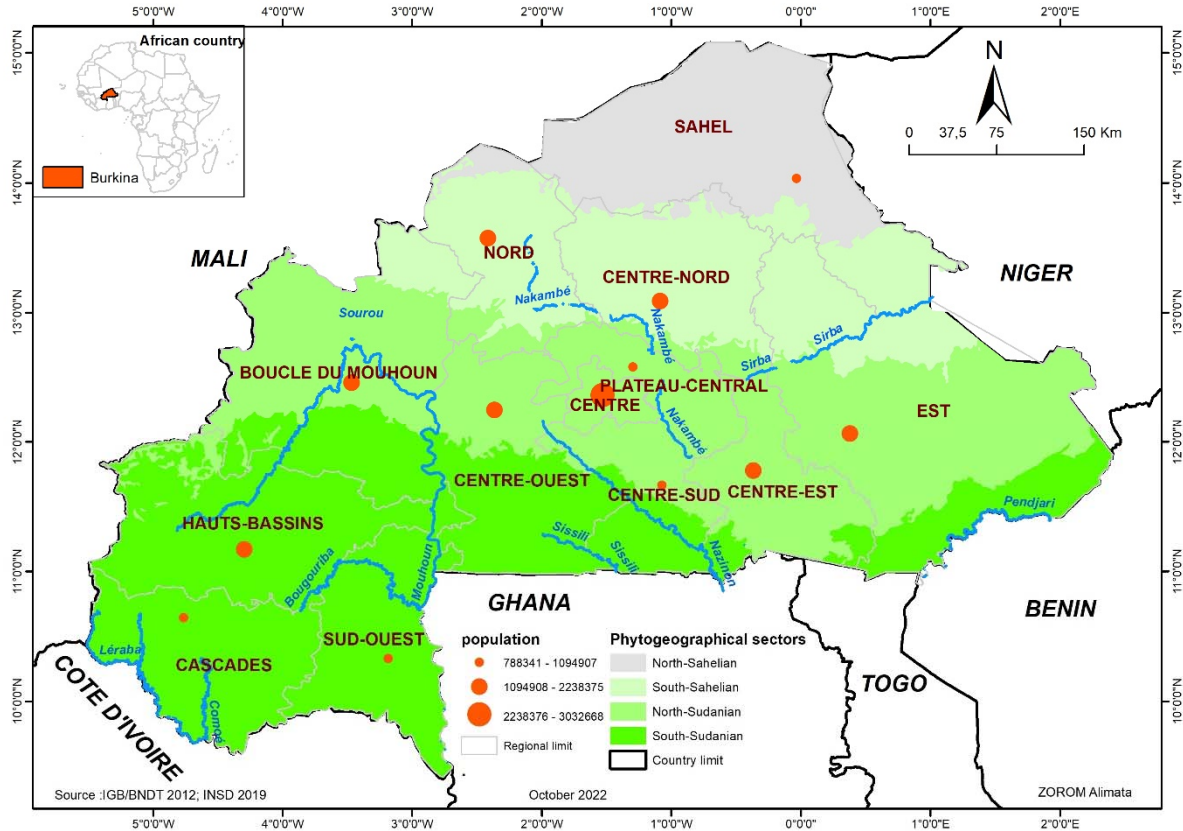


Figure 1: Secteurs phytogéographiques du Burkina

Sur le plan de l'occupation des terres, les résultats du deuxième Inventaire Forestier National [16] (révèlent que les zones d'occupation de cultures pluviales et les terres d'agroforesteries sont les espaces les plus répandus au niveau national (38 %), suivi de zones de pâturages couvrant en majeure partie par la savane arbustive et herbeuse (36,9 %) et la steppe arbustive et herbeuse (16 %) [17]. Quant à la savane arborée, celle-ci occupe 4,8 %. Les zones de couverture végétale dense se localisent tout le long des cours d'eau, de leurs affluents et des zones de conservations forestières en majorité situées dans le secteur phytogéographique sud-soudanien. La figure 2 présente la carte d'occupation des sols téléchargées sur <https://levviewer.vito.be/2019/Burkina%20Faso>.

¹ <https://luxdev.lu/fr/activities/country/BKF> consulté le 22 juillet 2022

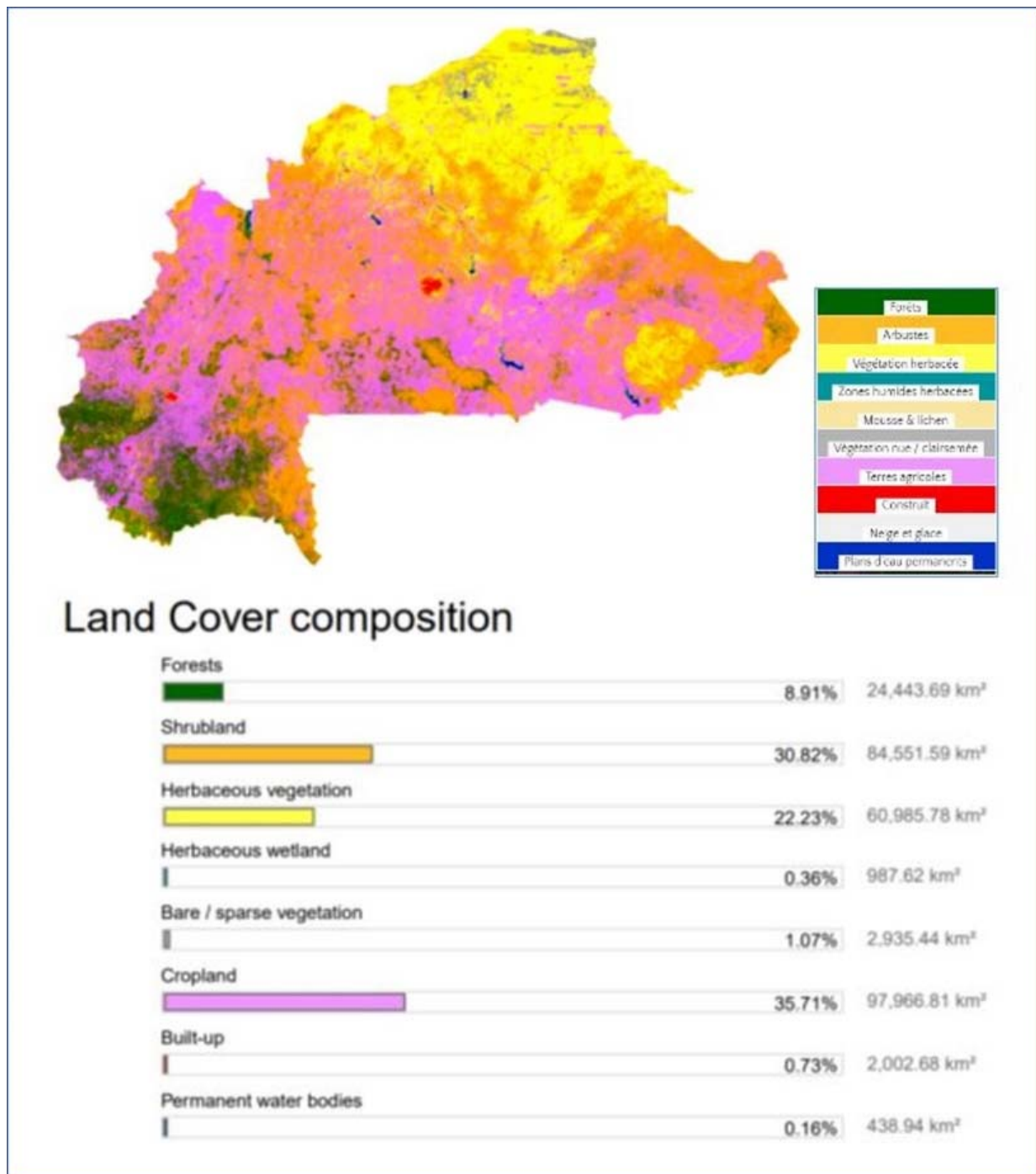


Figure 2 : carte d'occupation des sols

Source : <https://lcviewer.vito.be/2019/Burkina%20Faso>

2. 2. Données satellitaires FAPAR

Les produits satellitaires de FAPAR utilisés proviennent des capteurs de Sentinel-3/OLCI, de PROBA-V et de SPOT-végétation. Ils sont librement accessibles sur la plateforme du Service Copernicus Global Land (CGLS) au lien <http://land.copernicus.eu/>. L'acquisition des images FAPAR a été réalisée par lien FTP (File Transfer Protocol) grâce à l'application Filezilla. Les images ont été renommées avec l'application Lupas Rename pour une harmonisation. Le logiciel SPIRITS (Software for the Processing and Interpretation of Remotely sensed Image Time Series) a été utilisé pour l'importation des images TIFF en format IMG. Le

lissage des images IMG FAPAR a été réalisé par l'algorithme SWETS (Weighted least-squares linear regression). La série temporelle d'images FAPAR décennales utilisées couvre la période d'étude de vingt et un (21) ans allant de 1999-2020. La résolution spatiale des produits FAPAR est de 1 km. Sur ces produits, les métriques statistiques du maximum et de la moyenne ont été calculées en utilisant les images décennales couvrant la période de la 3^e décennie du mois d'août, à la 2^e décennie du mois d'octobre. Le choix de cette période d'extraction a été opéré en raison de l'atteinte du pic de végétation très précocement au Sahel et tardivement dans la région au Sud-Ouest.

2.3. Termes statistiques utilisés pour l'analyse de la dynamique de la végétation

Trois paramètres statistiques ont été utilisés pour l'analyse de la dynamique de la végétation. Il s'agit du coefficient de variation, la pente de la droite de tendance (a) et l'anomalie standardisée de la végétation (Z-score). Le coefficient de variation (CV) a été utilisé pour déterminer la variabilité de la production de la végétation. La pente de la droite de tendance a été obtenue par ajustement de la courbe de la végétation par la méthode des moindres carrés. La cartographie de la pente permet d'apprécier la tendance d'évolution de la production de la végétation au plan spatial. En d'autres termes, ce paramètre permet d'apprécier les zones de gain et de perte de la production de la végétation. L'anomalie standardisée de la végétation a été utilisée pour déterminer le nombre d'années déficitaires et excédentaires en production de végétation sur la période 1999-2019. Sur le plan spatial, des interpolations ont été faites pour étendre les données discrètes en tout point de la zone étude (données continues/matricielles). La méthode d'interpolation du Krigeage ordinaire a été utilisée. La méthode de seuils naturels de Jenks a été utilisée pour représenter les différentes classes de métriques statistiques utilisées.

$$[a = \frac{\sum (xi - xm)(yi - ym)}{\sum (xi - xm)^2} \text{ et/ou } a = (ym - axm)] \text{ Eq.1}$$

$$Z - Score = \frac{Vi - Vm}{\text{écart type}} \text{ Eq. 2}$$

$$CV (\%) = \frac{\text{Ecart type} * 100}{\text{moyenne}} \text{ Eq. 3}$$

Avec Vi : Valeur de l'indice FAPAR à l'instant, Vm : Valeur de la moyenne du produit sur la période ciblée, CV : coefficient de variation

III. RÉSULTATS

3.1. Zones de variabilités de la production de la végétation

La **Figure 3** présente les classes de variation de la production de la végétation captées par la métrique du maximum (figure 3.a) et de la moyenne (figure 3.b) sur la période 1999-2019. Les deux métriques capturent différemment les classes de variabilité de la végétation. La métrique de la moyenne capture très faiblement les classes de variabilité de la végétation comparativement à celle du maximum. Elle n'indique aucun contraste de variabilité de végétation dans le secteur sud-soudanien. Par contre, la métrique du maximum révèle que la classe de forte variabilité (10 à 19 %) de la production de la végétation couvre tout le secteur nord-sahélien et une partie du secteur sud-sahélien. Cette forte variabilité pourrait se traduire par des gains ou des pertes de production de la végétation en fin de la campagne agropastorale. La forte variabilité de la végétation est observée dans les secteurs phytogéographiques marqués par l'expansion de zones de culture pluviale. La variabilité moyenne (7 à 9 %) couvre une partie importante du territoire et diminue progressivement dans les secteurs phytogéographiques du nord vers le sud au profit de la classe de variabilité faible (2 à 6 %) qui est la plus dominante au niveau national. La classe de variabilité faible couvre les zones de végétation ligneuse localisée au sud du pays.

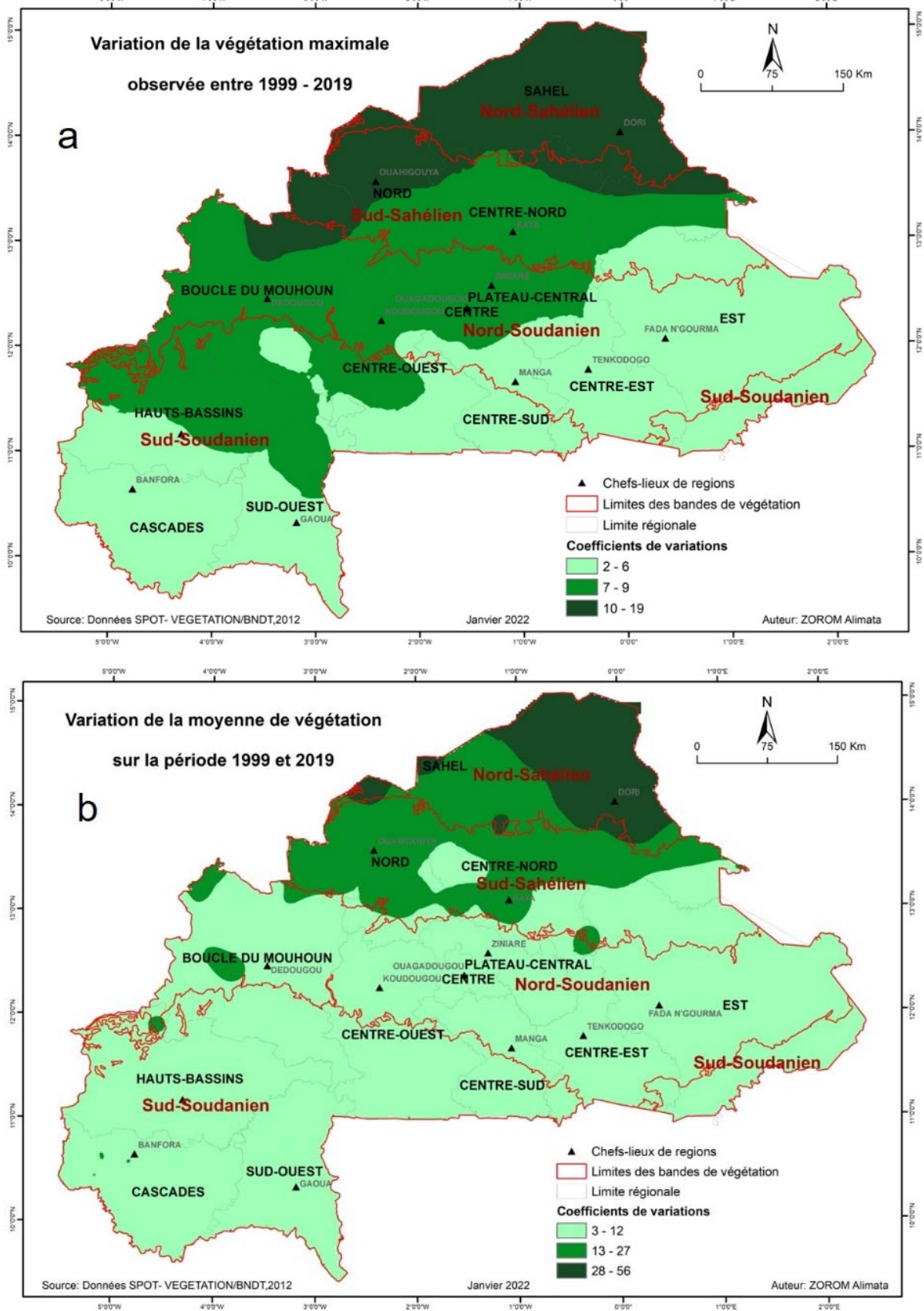


Figure 3: Variation spatiale de la production de la végétation

3.2. Tendance d'évolution de la végétation

La **Figure 4** présente les classes de la tendance d'évolution de la végétation évaluées sur la période 1999-2019. Comparativement à la variabilité, les tendances d'évolution de la végétation capturées par les deux métriques sont jugées complémentaires. La métrique de la moyenne présente des contrastes plus marqués comparativement à celle du maximum. Dans l'ensemble, la tendance de gain de production de la végétation au Burkina est appréciée moyenne sur la période 1999 à 2019. La forte tendance de gain de la production de la végétation concerne que sept (7) régions. Il s'agit du Nord, du Centre-Nord, du Plateau-Central, de la Boucle du Mouhoun, du Sahel, du Centre-Ouest et des Hauts-Bassins. Dans ces régions, la pente de la droite de tendance présente des valeurs positives élevées (0, 54 à 2,59). La forte valeur positive de la pente de la droite de tendance est interprétée comme des gains de production de la végétation. Cette situation pourrait s'expliquer en majeure partie par l'expansion des zones de cultures de céréales et aussi de l'activité de conversion des terres encroûtées en terres exploitables ou plus productives. Par contre, les zones de faible tendance de gain de production de la végétation sont observées surtout dans les régions de l'Est, des Cascades et dans la partie des régions du Centre-Ouest, du Centre-Sud, du Centre-Est et du Sud-Ouest. Dans ces régions, les zones de faible tendance de gain de la production de la végétation ne concernent spécifiquement que les aires de conservation forestières. En effet, ces types espaces correspondent à zones d'occupation de savanes arbustive, arborée, ou de forêts-galeries. Les gains de production de la végétation dans ces types de formations ligneuses sont très faibles comparativement à celles zones de cultures ou des formations herbeuses. Les zones de cultures répondent plus au signal pluviométrique et à l'utilisation des fertilisants. Cependant, l'approche de l'interpolation spatiale de ces métriques statistiques ne fournit pas assez de détail en matière de changement de l'utilisation des terres. Elle pourrait renfermer des biais, car les sols nus, les zones d'habitations, les plans d'eaux ne sont pas différenciés sur ces cartographies en général.

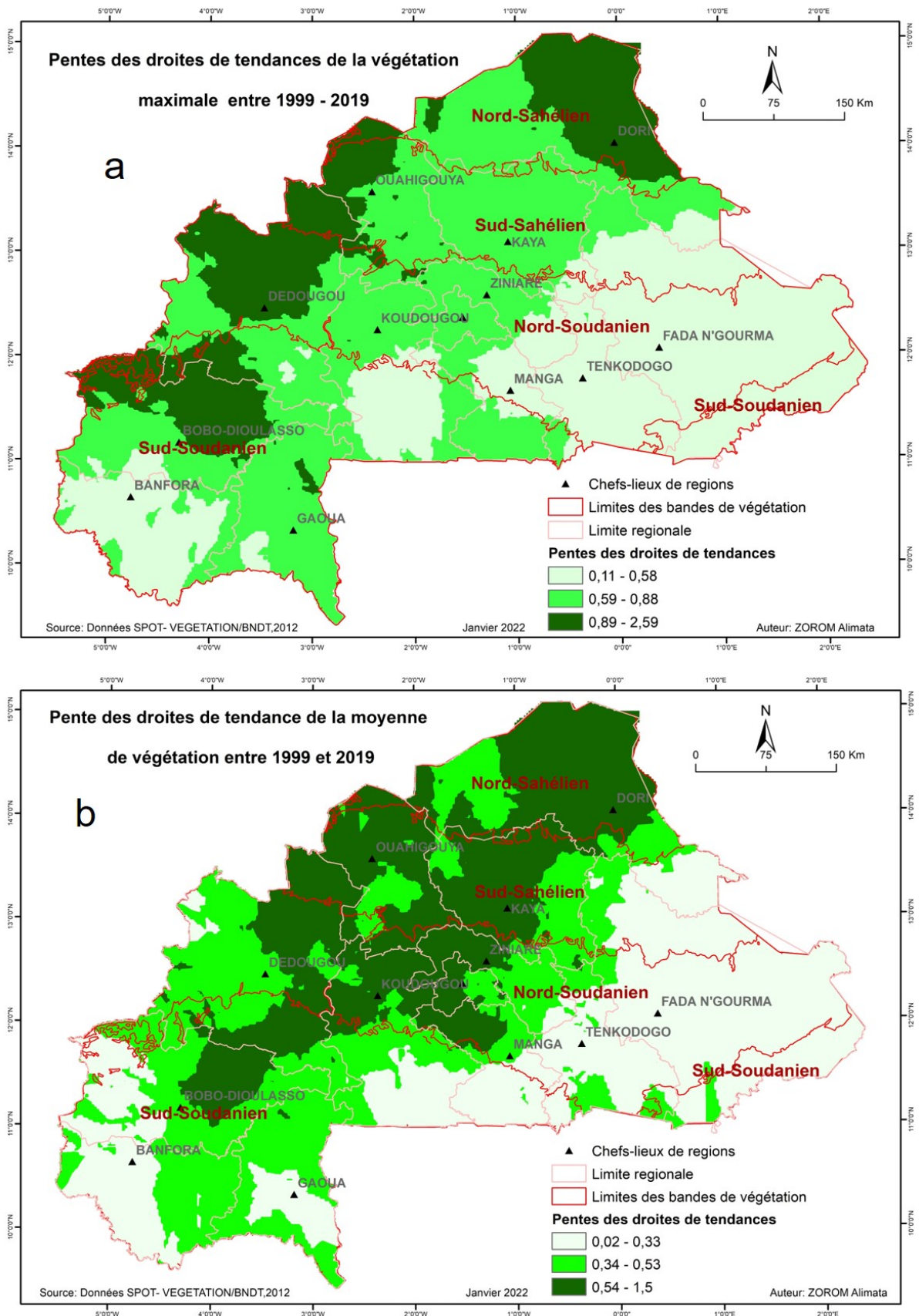


Figure 4: Tendance d'évolution de la production de la végétation

3.3. Fréquence des années d'abondance et de déficit de végétation sur la période 1999-2019

3.3.1. Fréquences d'années d'abondance de la végétation

La **Figure 5** présente les classes du nombre d'années d'abondance de la végétation sur une durée de 21 ans. L'abondance de la végétation a été définie par une valeur positive du Z-score. Les métriques du maximum et de la moyenne de la végétation ont été utilisées pour la spatialisation du Z-score. Ces deux métriques n'ont pas la même manière de capturer les différentes classes de fréquence d'années d'abondance de la végétation. La capture de la classe à faible fréquence d'année d'abondance de la végétation présente une complémentarité pour les deux métriques utilisées. Globalement, la classe de 3 à 5 années d'abondance de la production de la végétation est la plus fréquente sur une durée de 21 ans (1999-2019). Les zones à faible fréquence (0 à 3 ans) de l'abondance de la végétation se localisent probablement d'une part dans les régions de l'Est, des Cascades et du Sud-Ouest et d'autre part dans certains endroits, de la partie sud des régions du Centre-Est, du Centre-Sud et du Centre-Ouest.

Par ailleurs, les faibles tendances de gain de production de la végétation ont été effectivement observées dans ces régions. Cela pourrait s'expliquer par une persistance des pauses pluviométriques de longues durées dans ces régions. Les régions qui ont enregistré une persistance des années d'abondances de la végétation élevées (5 à 7 ans) sont : la Boucle du Mouhoun, le Nord, le Centre-Ouest et une partie du Sahel et des Hauts-Bassins. La persistance des années d'abondance de la végétation dans ces régions entraîne parfois des gains de la production de la végétation. Cela pourrait être lié à la qualité des pluies d'une part et d'autre part à l'utilisation des fertilisants dans les zones cultures.

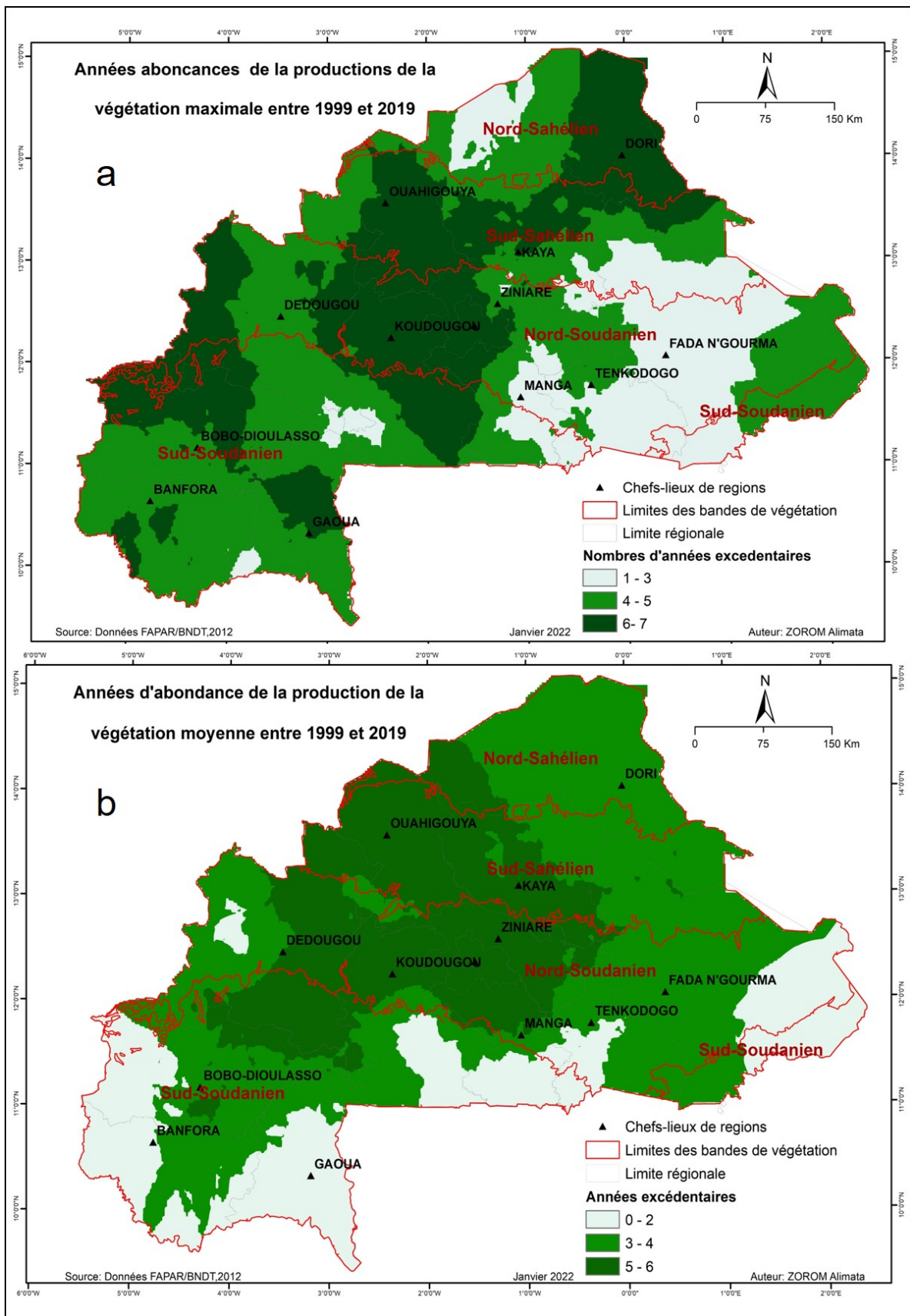


Figure 5: Classes de nombres d'années d'abondances de la végétation

3.3.2. *Fréquence d'années déficitaires de la végétation*

La figure 6 présente les zones de persistance du déficit de production de la végétation. Le déficit de production de la végétation a été défini par des valeurs négatives du Z-score par année. Le nombre d'années de déficit de la production de végétation a été évalué sur une durée de 21 ans. La classe de persistance du déficit de la production de la végétation est cernée différemment par les deux métriques utilisées. La métrique du maximum donne une bonne capture des zones de persistance de déficit de production de la végétation comparativement à celle de la moyenne. La métrique du maximum révèle que les zones de fortes variabilités de la végétation sont aussi marquées par une fréquence élevée d'années d'abondance et de déficit de production de la végétation. Les zones de gain de production de végétation sont superposables aux zones de faible fréquence d'année de déficit de production. Les zones à faible gain de production de la végétation touchent probablement la région de l'Est, du Centre-Est, des Cascades, du Sud-Ouest. Cependant, dans le secteur sud-soudanien, il est observé qu'une faible fréquence d'années de déficit de production ne conduit pas forcément à une tendance de gain de production de la végétation sur la période 1999-2019. Dans les secteurs sahéliens nord et sud, une faible fréquence des années de déficit de production s'accompagne de gain de production végétation. Cela pourrait s'expliquer par la pluviométrie qui reste une variable déterminante dans la productivité de la végétation dans le domaine du climat sahélien.

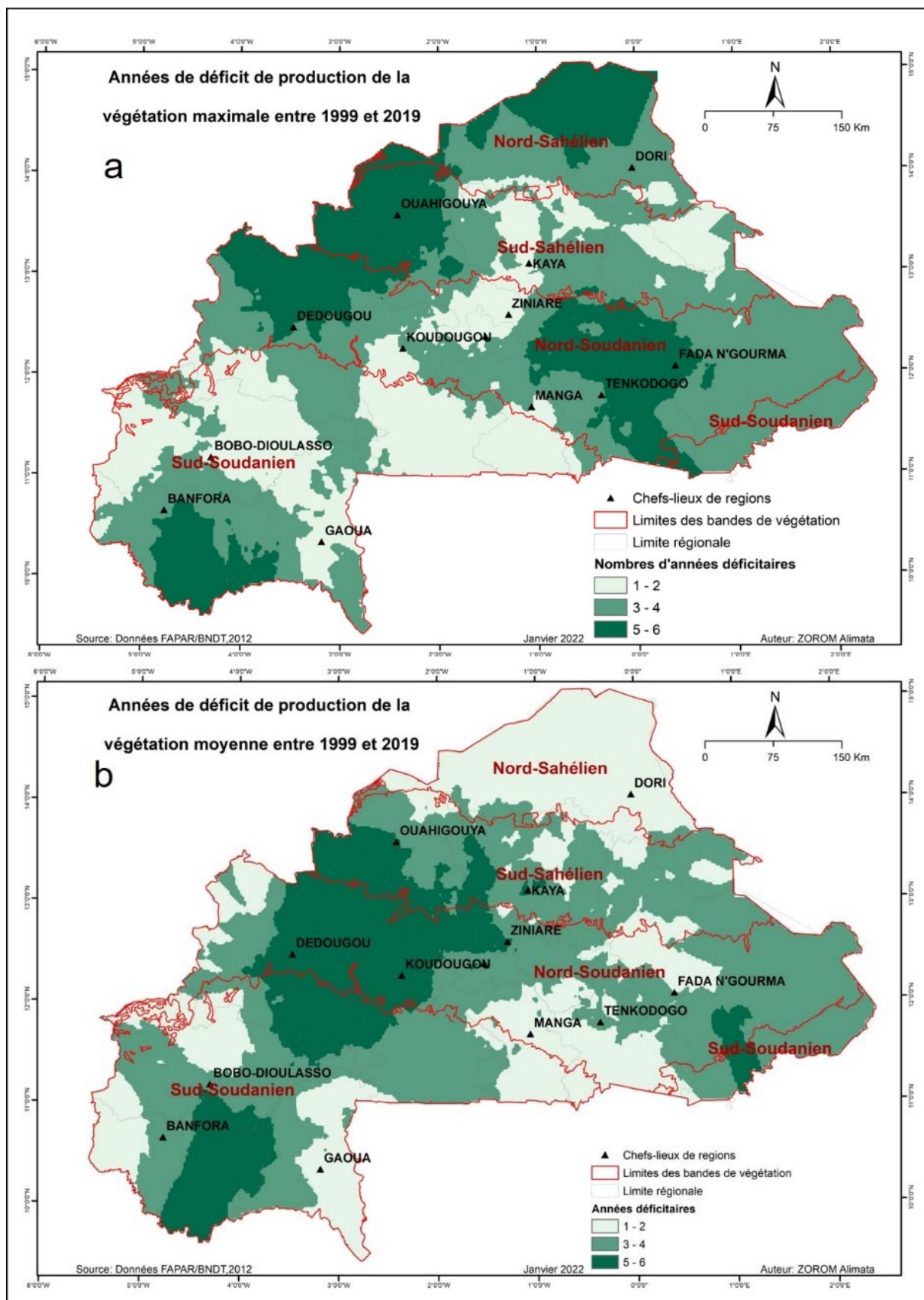


Figure 6: Classes de nombres d'années déficitaires de la végétation

IV. DISCUSSION

L'objectif de cette étude vise à apprécier la dynamique de la végétation du Burkina Faso sur la période 1999-2019 à partir de séries temporelles d'images FAPAR. Il s'agit de visualiser les différentes zones de variabilités de la production de la végétation, de cerner des zones d'anomalies, et de relever les zones à forte tendance de gain de la production de la végétation sur une durée de 21 ans (1999 à 2019). Quelles sont les grandes tendances générales de la végétation au Burkina ? et quelle est la cohérence de ces résultats avec les sources d'informations existantes dans la littérature ?

À partir de ces résultats, on retiendra pour les grandes tendances de changement que : i) les fortes variabilités de la production de la végétation se localisent dans les secteurs phytogéographiques marqués par une forte expansion des zones de cultures et les faibles variabilités pour les secteurs phytogéographiques caractérisés par l'abondance de formations végétales ligneuses, ii) les fortes tendances de gains de production de la végétation s'observent au niveau du domaine sahélien et du secteur phytogéographique nord-soudanien, et les faibles gains pour les secteurs phytogéographiques dominés par des formations ligneuses, iii) dans le domaine sahélien et le secteur nord du domaine soudanien, la faible fréquence des années de déficit de production entraîne de gain de productivité de la végétation sur la période 1999-2019. Cependant, dans les secteurs de formations ligneuses même une faible fréquence des années de déficit de production n'entraîne pas des gains sur une longue période. Les régions qui ont enregistré une persistance des années d'abondances de la végétation sont : la Boucle du Mouhoun, le Nord, le Centre-Ouest et une partie du Sahel et des Hauts-Bassins. Les zones à faible gain de production de la végétation touchent probablement la région de l'Est, du Centre-Est, des Cascades, du Sud-ouest.

Les gains de la production de la végétation dans le domaine sahélien et du secteur phytogéographique nord-soudanien sont liés essentiellement à l'utilisation des fertilisants dans l'agriculture et à la pluviométrie. Cependant, il a été rapporté par des auteurs qu'une grande partie des tendances positives au Sahel sont causées par l'augmentation de la biomasse foliaire des espèces ligneuses en raison d'une régénération du couvert forestier après une longue période sèche [18]. Ces grandes tendances de la dynamique de la végétation cernée par cette approche ne remettent pas en cause les conclusions de plusieurs études menées sur le Burkina Faso [17], [2], [19].

Les métriques du maximum et de la moyenne peuvent cerner la dynamique globale de la végétation dans les secteurs phytogéographiques. Leur utilisation se révèle complémentaire pour apprécier les tendances générales de la végétation. C'est dans ce sens que nombreuses études d'estimation des rendements fourragers basés sur la modélisation utilisent ces métriques pour estimer la biomasse végétale [7]. Par ailleurs, de nombreuses études de modélisation des pâturages en zone sahélienne ont indiqué que les métriques de la phénologie de la végétation peuvent être des variables d'intérêt pour l'estimation de la biomasse [20], [7], [21], [22], [23]. Ces métriques sont en lien avec Maximum value (vmx), Average value (vav), Minimum value (vmn), Largest increase (angle) between subsequent periods (aup). La variable aup est une métrique spécifique pour la capture de zones de végétation ligneuse. Ainsi, ces métriques combinées à d'autres variables améliorent la précision des estimations des rendements fourragers. En s'appuyant sur cette idée de combinaison de plusieurs métriques, nous pensons que la cartographie grossière observée est liée à la non-combinaison des métriques dans cette démarche. Plus particulièrement, les résultats de la présente cartographie ne fournissent pas assez de détail dans les zones à forte hétérogénéité de la végétation. En effet, il a été rapporté par des résultats d'études de modélisation que l'utilisation des seules métriques du maximum et de la moyenne ne fournit pas une bonne précision de l'estimation de la biomasse végétale [23]. Des résultats de cartographie plus détaillée peuvent s'observer avec une combinaison de plusieurs métriques appropriées. Mais cette démarche se fait dans la construction de modèle de régression multilinéaire utilisant plusieurs métriques [7], [23]. Elle est possible que lorsqu'il s'agit de couplage de données terrain à celles des indices satellitaires. Dans le contexte actuel du Burkina, les données historiques de collecte de la biomasse végétale sur une longue profondeur d'année sont quasi-inexistants. Mais les résultats de cette étude corroborent avec celle de l'étude basée sur la dynamique spatiale et temporelle des précipitations sur la période 1991-2020 au Burkina Faso [24]. Le gain de la production de végétation observé dans les secteurs sahéliens et nord-soudaniens est dû à l'amélioration des précipitations favorisant la mise en place des cultures et la régénérescence de la savane arborée et arbustive. Par ailleurs, nos résultats de gains de production de la végétation sont en accord avec les résultats d'études portant sur le reverdissement du Sahel [25]. Les produits FAPAR utilisés permettent de cerner les tendances générales de la dynamique de la végétation au Burkina. Mais, une cartographie basée sur un modèle combinant plusieurs types de métriques donnera plus de détails de zone de changement de la productivité de la végétation.

V. CONCLUSION

En somme, les résultats de la cartographie utilisant les métriques phénologiques du maximum et de la moyenne des produits FAPAR ont permis de cerner la dynamique globale de changement de la productivité de la végétation du Burkina sur une durée de 21 ans. Les gains de production de végétation ont été observés dans les secteurs phytogéographiques marqués par une forte expansion de zones cultures. Ces changements ont été possibles grâce une faible récurrence des années de déficit de la production végétale qui pourraient être liée à la caractéristique d'une nouvelle normale climatique (1991-2020) plus humide. Cependant les gains de changement de la production de la végétation ont été faibles dans les secteurs phytogéographiques marqués par une abondance relative des formations ligneuses. La récurrence des années de déficit de production de la végétation touche plus particulièrement les régions des Cascades, du Sud-ouest, de l'Est et la partie sud de la région du Centre-Ouest, du Centre-Sud et du Centre-Est. Ces résultats de la cartographie donnent une tendance globale et conforme aux informations de la littérature. Cependant, la démarche peut être améliorée en disposant des données terrain de collecte de biomasse végétale pour la construction de modèle multilinéaire permettant de combiner plusieurs métriques de végétation.

RÉFÉRENCES

- [1] **Sarr B. A., Totin V. S. H., Houssou C. S., Sinsin B (2015)**. Variation du régime pluviométrique de la périphérie de la réserve de biosphère transfrontalière du w au Bénin. XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège 2015.
- [2] **Ouoba P. A., Pare S., Da D. E. C., (2013)**. Contribution de l'indice dérivé ICN et ICV dans l'analyse de l'évolution récente de la biomasse au sahel, Burkina Faso. The 7th edition of the international congress Geo Tunis; 8-10/04/2013 à Tunis, Tunisie. 16p. www.geotunis.org/wp.../2013/05/Ouoba-Pounyala-Awa-Mar.pdf
- [3] **Cissé S., Eymard L., Ndione J. A., Gaye A. T. (2015)**. Analyse statistique des relations pluie-végétation au Ferlo (Sénégal). XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège 2015. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01407442>
- [4] **Anyamba, A., & Tucker, C. J. (2005)**. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981 to 2003. *Journal of arid environments*, 63(3), 596–614. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.03.007>
- [5] **Herrmann, S. M., Anyamba, A., & Tucker, C. J. (2005)**. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change*, 15(4), 394–404. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2005.08.004>
- [6] **Beaudin, I. (2006)**. Potentiel de la télédétection pour le suivi et la caractérisation des conditions de sécheresse en milieu méditerranéen [programme en sciences géomatiques faculté de foresterie et géomatique]. Université LAVAL.
- [7] **Diouf, A. A., Brandt M., Verger A., El Jarroudi M., Djaby B., Fensholt R., Ndione J. A., And Tychon B. (2015)**, Fodder Biomass Monitoring in Sahelian Rangelands Using Phenological Metrics from FAPAR Time Series. *Remote Sensing*. 2015, 7, 9122–9148; doi: 10.3390/rs70709122. <https://doi.org/10.3390/rs70709122>
- [8] **Zhang, W., Brandt, M., Tong, X., Tian, Q., & Fensholt, R. (2018)**. Impacts of the seasonal distribution of rainfall on vegetation productivity across the Sahel. *Biogeosciences*, 15, 319-330. <https://doi.org/10.5194/bg-15-319-2018>
- [9] **Diouf, A. A., Sarr, M. A., Ba, T., Taugourdeau, S., Dieye, A. M., Sy, I., & Diop, A. T. (2017)**. Évaluation intra-saisonnière de la production fourragère des parcours naturels du Sénégal. <https://agritrop.cirad.fr/586088/>
- [10] **Gitelson, A. A., Peng, Y., Arkebauer, T. J., & Schepers, J. (2014)**. Relationships between gross primary production, green LAI, and canopy chlorophyll content in maize : Implications for remote sensing of primary production. *Remote Sensing of Environment*, 144, 65–72.
- [11] **Wang, S., & Trishchenko, A. (2011)**. Variations of Absorbed Photosynthetically Active Radiation over the Canadian Prairie in 2000–2008. *Journal of Agricultural Science*, 4(2), 57–68. <https://doi.org/10.5539/jas.v4n2p57>
- [12] **Thiombiano, A et Kampmann, D., (2010)**. Atlas de la Biodiversité de l'Afrique de l'Ouest, Tome II : Burkina Faso. Ouagadougou & Francfort/main, 592. <https://www.uni-frankfurt.de/47671336/BF-Atlas-complete2.pdf>
- [13] **SP/CNDD, (2017)**. Rapport de mise en œuvre du plan national d'adaptation aux changements climatiques au Burkina Faso.

- [14] **Somé, Y. S. C. (2010)**. SIG, analyse spatiale et modélisation de la distribution spatiale des formes moléculaires m et s d'*Anophèles gambiae s.s* au Burkina Faso [École doctorale sciences de l'homme et de la société laboratoire CEDETE]. Université d'Orléans. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00581100>
- [15] **INSD, (2020)** : Institut National de la Statistique et de la Démographie. Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 2019 (RGPH, 2019). Annuaire statistique 2021. INSD, Burkina Faso, 362.
- [16] **IFN, (2015)** : Inventaire Forestier National. Deuxième inventaire.
- [17] **MEEVCC (2015)**. Contribution Prévue Déterminée au niveau National (CPDN). Burkina Faso. 51
- [18] **Brandt, M., Verger, A., Diouf, AA, Baret, F., & Samimi, C. (2014)**. Tendances de la végétation locale dans le Sahel du Mali et du Sénégal à l'aide des produits satellitaires FAPAR de séries longues et des mesures sur le terrain (1982–2010). *Téledétection*, 6 (3), 2408-2434.
- [19] **Knauer, J., Zaehle, S., Reichstein, M., Medlyn, BE, Forkel, M., Hagemann, S. et Werner, C. (2017)**. La réponse de l'efficacité de l'utilisation de l'eau par les écosystèmes à l'augmentation des concentrations atmosphériques de CO₂ : sensibilité et implications biogéochimiques à grande échelle. *Nouveau phytologiste*, 213 (4), 1654-1666.
- [20] **Meroni, M., Rembold, F., Verstraete, MM, Gommès, R., Schucknecht, A., & Beye, G. (2014)**. Étudier la relation entre la variabilité interannuelle de la phénologie de la végétation dérivée des satellites et un proxy de la production de biomasse au Sahel. *Téledétection*, 6 (6), 5868-5884.
- [21] **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.
- [22] **Tian, F., Brandt, M., Liu, Y. Y., Verger, A., Tagesson, T., Diouf, A. A.,... & Fensholt, R. (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 Sensing of Environment*, 177, 265–276.
- [23] **Garba, A., Djima, I.T., Abdou, L., & Mahamane, A. (2017)**. Caractérisation de la végétation ligneuse du bassin versant de la Maggia dans la commune rurale de Bagaroua (région de Tahoua). *Journal international des sciences biologiques et chimiques*, 11 (2), 571-584.
- [24] **Some, Y.S.C., Zorom, A., & Some, W., (2022)**. Etude de la dynamique spatiale et temporelle des précipitations sur la période 1991-2020 au Burkina Faso. *Journal américain de recherche scientifique universitaire pour l'ingénierie, la technologie et les sciences*, 90 (1), 52-62. Extrait de https://asrjetsjournal.org/index.php/American_Scientific_Journal/article/view/7967
- [25] **Leroux, DJ, Calvet, JC, Munier, S., & Albergel, C. (2018)**. Utilisation de produits de végétation dérivés de satellites pour évaluer LDAS-Monde sur la zone euro-méditerranéenne. *Téledétection*, 10 (8), 1199.