

UTILISATION DE GOOGLE
EARTH ENGINE ET DES
SYSTÈMES
D'INFORMATION
GÉOGRAPHIQUE POUR
L'ÉVOLUTION DE LA
GRANDE MURAILLE VERTE

Auteur : Descombes Lucas Alexandre
Bachelier universitaire en Biologie

Directeur de mémoire : Professeur Giuliani Grégory
Affiliation : Institut des Sciences de l'Environnement (UNIGE)

Co-directeur de mémoire : Dr Bocar SY
Affiliation : École des Mines de la Géologie et de l'Environnement
(Université Ahmadou Mahtar Mbow) -Dakar-Sénégal

DROITS D'AUTEUR

Les citations tirées du présent mémoire ne sont permises que dans la mesure où elles servent de commentaire, référence ou démonstration à son utilisateur. La citation doit impérativement indiquer la source et le nom de l'auteur. La loi fédérale sur le droit d'auteur est applicable.

Table des matières

DROITS D’AUTEUR.....	1
Table des illustrations :.....	3
Résumé.....	7
1. Introduction.....	8
2. Matériel et méthode	11
2.1 Les programmes et logiciels	11
2.2 Les données.....	11
2.3 Méthodologie	12
2.3.1 Sélection des zones d’intérêts.....	13
2.3.2 Sélection des collections d’images et leurs traitements.....	14
2.3.3 Analyses des données	16
3. Résultats.....	20
3.1 Région d’intérêt.....	20
3.2 Histogrammes	20
3.3 Séries temporelles.....	22
3.3.1 Exemple du Sénégal.....	22
3.4 Tableau des différences de NDVI 2006-2020	25
3.5 Cartes des différences du NDVI.....	28
4. Discussion	40
4.1 GMV.....	40
4.2 Sahel	41
4.3 Pays.....	43
5. Conclusion	47
6. Bibliographie.....	48
7. Annexes	51
7.1 Bandes spectrales.....	51
7.1.1 Landsat7	51
7.1.2 Landsat8	51
7.2 Histogrammes	52
7.3 Séries temporelles.....	59
7.3.1 Mauritanie	59
7.3.2 Mali.....	61
7.3.3 Burkina Faso	63
7.3.4 Niger	65
7.3.5 Nigeria	67

7.3.6 Cameroun	69
7.3.7 Tchad	71
7.3.8 Soudan.....	73
7.3.9 Erythrée	75
7.3.10 Ethiopie.....	77
7.3.11 Djibouti	78
7.4 Tableaux des p-values des séries temporelles	79
7.5 Diagrammes quantile-quantile.....	79
7.6 Code GEE	81

Table des illustrations :

Cartes :

Carte 1 : Carte tirée de l'article de Cheikh Mbow (2) représentant le parcours Sud de la GMV. _____	9
Carte 2 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Sénégal. _____	28
Carte 3 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour la Mauritanie. _____	29
Carte 4 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Mali. _____	30
Carte 5 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Burkina Faso. _____	31
Carte 6 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Niger. _____	32
Carte 7 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Nigeria. _____	33
Carte 8 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Cameroun. _____	34
Carte 9 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Tchad. _____	35
Carte 10 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Soudan. _____	36
Carte 11 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour l'Erythrée. _____	37
Carte 12 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour l'Ethiopie. _____	38
Carte 13 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour Djibouti. _____	39
Carte 14 : représentation du Lac Tchad, tiré de l'article (25). _____	45

Figures :

Figure 1 : schéma représentant les différentes étapes de la méthodologie de ce travail	13
Figure 2 : Capture d'écran du « Layer Manager » de GEE avec, en jaune le Sahel, en noir le parcours de la GMV et en gris les différents pays traversés par la GMV.	14
Figure 3 : Bits de la band qa, image tiré de la fiche d'information sur « USGS Landsat 7 Surface Reflectance Tier 1 » disponible dans GEE	16
Figure 4 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2007. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.	20
Figure 5 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2014. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.	21
Figure 6 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2020. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.	21
Figure 7 : Graphique empilé représentant le nombre de pixels par valeur NDVI pour les années 2007, 2014, 2020	22
3.3.1 Exemple du Sénégal Figure 8 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV au Sénégal.	22
Figure 9 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV au Sénégal.	23
Figure 10 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel au Sénégal.	24
Figure 11 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le Sahel au Sénégal	24
Figure 12 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2007. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.	52
Figure 13 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2008. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.	52
Figure 14 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2009. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.	53
Figure 15 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2010. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.	53
Figure 16 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2011. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.	54
Figure 17 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2012. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.	54
Figure 18 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2013. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.	55
Figure 19 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2014. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.	55
Figure 20 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2015. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.	56
Figure 21 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2016. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.	56
Figure 22 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2017. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.	57
Figure 23 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2018. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.	57
Figure 24 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2019. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.	58
Figure 25 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2020. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.	58

Figure 26 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV en Mauritanie.	59
Figure 27 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV en Mauritanie.	59
Figure 28 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel en Mauritanie.	60
Figure 29 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le Sahel en Mauritanie.	60
Figure 30 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV au Mali.	61
Figure 31 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV au Mali.	61
Figure 32 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel au Mali.	62
Figure 33 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le sahel au Mali.	62
Figure 34 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV au Burkina Faso.	63
Figure 35 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV au Burkina Faso.	63
Figure 36 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel au Burkina Faso.	64
Figure 37- : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le Sahel au Burkina Faso.	64
Figure 38 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV au Niger.	65
Figure 39 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV au Niger.	65
Figure 40 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel au Niger.	66
Figure 41 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le Sahel au Niger.	66
Figure 42 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV au Nigeria.	67
Figure 43 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV au Nigeria.	67
Figure 44 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel au Nigeria.	68
Figure 45 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le Sahel au Nigeria.	68
Figure 46 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV au Cameroun.	69
Figure 47 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV au Cameroun.	69
Figure 48 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel au Cameroun.	70
Figure 49 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le Sahel au Cameroun.	70
Figure 50 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV au Tchad.	71
Figure 51 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV au Tchad.	71
Figure 52 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel au Tchad.	72
Figure 53 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le Sahel au Tchad.	72
Figure 54 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV au Soudan.	73
Figure 55 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV au Soudan.	73
Figure 56 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel au Soudan.	74
Figure 57 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le Sahel au Soudan.	74
Figure 58 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV en Erythrée.	75
Figure 59 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV en Erythrée.	75
Figure 60 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel en Erythrée.	76
Figure 61 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le Sahel en Erythrée.	76
Figure 62 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV en Ethiopie.	77
Figure 63 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV en Ethiopie.	77
Figure 64 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV à Djibouti.	78
Figure 65 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV à Djibouti.	78
Figure 66 : Diagramme Quantile-Quantile des valeurs de difference entre l'année 2006 et 2020 par pays.	79
Figure 67 : Diagramme Quantile-Quantile des valeurs de difference entre l'année 2006 et 2020 par region du Sahel par pays.	80
Figure 68 : Diagramme Quantile-Quantile des valeurs de difference entre l'année 2006 et 2020 par region de la GMV par pays.	80

Tableaux :

Tableau 1 : Tableau des valeurs NDVI par pays pour 2006 et 2007, et de la différence entre ces deux années _____	25
Tableau 2 : Tableau des valeurs NDVI par région du Sahel par pays pour 2006 et 2007, et de la différence entre ces deux années _____	26
Tableau 3 : Tableau des valeurs NDVI pour la GMV par pays pour 2006 et 2007, et de la différence entre ces deux années _____	26
Tableau 4 : Tableau décrivant les bandes spectrales de Landsat7, d'après l'earth observing system (https://eos.com/find-satellite/landsat-7/) _____	51
Tableau 5 : Tableau décrivant les bandes spectrales de Landsat8, d'après l'earth observing system (https://eos.com/find-satellite/landsat-8/) _____	51
Tableau 6 : tableau regroupant les p-values des modèles linéaires des séries temporelles. En vert, les scores pour la GMV par pays (séries temporelles 1999-2006 et 2007-2020) et en jaune, les scores pour le Sahel par pays (séries temporelles 1999-2006 et 2007-2020). Les valeurs en gras sont les p-values significatives au seuil 0.05. _____	79

Résumé

Le Sahel est une région qui connaît une dynamique climatique importante. Elle a connu de grandes sécheresses dans les années 1970 et 1980 et connaît d'importants problèmes de dégradation du sol et d'aridification. Pour résoudre ces problèmes et améliorer la vie des millions d'habitants de cette région d'Afrique, les pays sahéliens se sont regroupés pour former l'initiative de la Grande Muraille Verte (GMV) en 2007. Cette initiative a pour but de créer un patchwork de paysages verts et productifs afin de réhabiliter les sols et de stopper l'aridification de leurs territoires. La GMV veut réhabiliter environ 10 millions d'ha par année. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de mémoire de certificat complémentaire en géomatique. Le but de ce travail est d'analyser et d'utiliser l'indice de végétation par différence normalisé (NDVI) des images satellites Landsat7 et Landsat8 sur une période allant de 1999 à 2020 pour la région GMV mais aussi pour le Sahel. Le NDVI permet de faire des histogrammes annuels et empilés de la GMV, des séries temporelles par pays (GMV et Sahel) et des cartes de différences entre l'année 2006 et 2020 afin de déterminer si la GMV a permis de reverdir et de stopper l'aridification de cette région du globe. Les résultats de ce travail montrent un reverdissement global sur l'ensemble de la région de la GMV et du Sahel, avec un clivage Est-Ouest où l'Est de la GMV semble se reverdir de façon plus importante que l'Ouest. Cependant, ils sont à nuancer car il peut y avoir de fortes disparités régionales, avec certaines zones qui se reverdisent et d'autres régions adjacentes qui deviennent plus sèches.

Mots clés :

Téledétection, Grande Muraille Verte (GMV), Sahel, Afrique, Landsat, Système d'Information Géographique (SIG), Google Earth Engine, NDVI, évolution

1. Introduction

La région du Sahel en Afrique est une région de transition entre le Sahara et la savane boisée soudanienne (1). Cette région est localisée entre le 11°-N et 18°-N, et possède un fort gradient de pluviométrie allant de 200mm/an pour les zones les plus arides à plus de 800mm/an (1). À titre de comparaison, à Genève, il tombe environ 1400 mm/an (2). C'est une région où l'on peut trouver toute une flore variée typique des steppes aussi bien que des paysages boisés. Les principales activités humaines dans cette zone du monde sont d'ordre pastoral et agricole. Le Nord, plus aride, est dominé par les activités pastorales qui emploient plus de 50 millions de personnes (1). Le Sud est en revanche dominé par les activités agricoles (1). Cette région est à l'avant-garde des conséquences du réchauffement climatique. En effet, une très grande variabilité du climat y est recensée depuis plusieurs dizaines d'années (3). Les précipitations peuvent varier d'une année à l'autre mais les températures ne cessent d'augmenter (1).

De plus, c'est une zone où les terres se sont dégradées de manière importante ces dernières décennies. Une mauvaise gestion des terres, une croissance démographique importante, le surpâturage, des sécheresses importantes, le tout combiné avec le réchauffement climatique, ont rendu cette zone de plus en plus sèche et aride (1,4,5). Ce constat est d'autant plus dramatique qu'environ 80% de la population du Sahel vit de la terre (4) et que l'approvisionnement en eau de la majorité du Sahel vient des pluies. Cette dégradation des sols et la perte des activités économiques qui lui sont liées amènent à des instabilités locales dans plusieurs pays. Migrations de population, exode rural, famine récurrente ou radicalisation d'une partie de la population (Boko Haram) sont des exemples de problèmes causés, entre autres, par la dégradation des sols et l'aridification de la région du Sahel (1,3–7).

Il est toutefois à noter que des études ont montré une tendance à un reverdissement du Sahel (3,8). Cette tendance au reverdissement mène à un paradoxe, appelé « Paradoxe du Sahel » où l'on constate à la fois une dégradation des sols avec une augmentation du ruissellement dans le Sahel mais également un certain développement de la flore (1,3,9). Cette augmentation du ruissellement est due au fait que, avec l'aridification et la perte de couverture végétale, les précipitations ne sont plus retenues et les eaux de pluies vont ruisseler sur le sol nu. Ceci conduit à une augmentation du débit des rivières et fleuves ainsi que de la hauteur des lacs (9). On a donc de plus grandes quantités d'eau dans les différentes sources d'eau malgré une diminution des précipitations en général (9). Il faut comprendre ce paradoxe sous la loupe de la disparité régionale. Ainsi, certaines régions se dégradent intensément alors que d'autres reverdisent légèrement et tout ceci sur de petites échelles spatiales (9).

De ce fait, les pays sahéliens ont décidé de s'unir pour stopper la dégradation des terres de cette région et combattre l'aridification du Sahel. En 2007, le Burkina Faso, Djibouti, l'Erythrée, l'Éthiopie, le Mali, la Mauritanie, le Niger, le Nigeria, le Sénégal, le Soudan et le Tchad ont créé l'Initiative de la Grande Muraille Verte (GMV), qui a été acceptée ensuite par l'Union Africaine sous le nom de « Initiative Grande Muraille Verte pour le Sahara et le Sahel »

(IGMVSS)(1,10,11). En effet, d'autres pays entourant le Sahara se sont joints à cette initiative. Finalement, plus de 20 pays en font partie (10). Il est à noter que dans le cadre de ce travail, seule la partie de la GMV au Sud du Sahara est étudiée. Par commodité, l'acronyme « GMV » sera utilisé pour décrire cette partie de l'IGMVSS.

Le but de cette initiative était initialement de créer un cordon végétalisé de plus de 7'100 kilomètres de long et de 15 kilomètres de large qui traverse toute la largeur de l'Afrique dans sa zone sahélienne (1). Dorénavant, il s'agit de créer une « mosaïque de paysages verts et productifs » exploités selon des pratiques durables d'utilisation du sol (10). Ce corridor « vert » part de la région proche de Dakar pour finir à Djibouti. La **Carte1** montre le tracé de



la GMV.

Carte 1 : Carte tirée de l'article de Cheikh Mbow (1) représentant le parcours Sud de la GMV.

L'objectif de la GMV est de revitaliser 10 millions d'hectares par an jusqu'en 2030 (10) pour un total de plus de 100 millions d'hectares et créer plus de 10 millions d'emplois (4). À ce jour, environ 15% de la GMV totale (Sud et Nord du Sahara) est terminée (4). Ainsi, il est estimé que 18 millions d'hectares ont déjà été restaurés et plus de 350'000 emplois créés (4).

Cette barrière végétale doit permettre aux populations locales d'améliorer leurs revenus et ainsi réduire la pauvreté des populations rurales en faisant la promotion d'activités génératrices de revenus sur le long terme. Mais elle doit permettre également de sécuriser leurs approvisionnements en nourriture en revitalisant les sols dégradés, via une meilleure gestion des sols (1). L'initiative de la GMV va même plus loin, car elle veut mettre en place une meilleure gestion des points d'eau, soutenir les pratiques agricoles et pastorales traditionnelles, tout en aidant les populations locales à s'adapter et atténuer le changement climatique à travers un programme de plantation d'arbres et d'augmentation de la couverture

arborée (1). La GMV est considérée comme un « programme phare » pour l’Afrique pour faire face à la désertification, l’insécurité alimentaire ou encore la pauvreté (10).

La GMV joue sur les principes du développement durable. En diminuant la pauvreté, en augmentant la sécurité alimentaire, en améliorant la gestion de l’eau, en augmentant la croissance économique locale, en essayant de lutter contre le réchauffement climatique à l’échelle locale, ou encore en cherchant à produire localement, la GMV applique au total 15 des 17 objectifs du développement durable (ODD) et ce sur toute la largeur du continent africain (4). Enfin, la GMV met les communautés locales au centre de l’action car ce sont ces dernières qui restaurent, s’occupent et vont tirer profit de l’exploitation durable des terres de la GMV (1,10).

Ce travail de mémoire du Certificat complémentaire en Géomatique s’inscrit dans le suivi de l’évolution de la GMV. En effet, il est question d’utiliser des outils de la géomatique et de la télédétection afin d’analyser des images satellites (Landsat7 et 8) pour visualiser si la région de la GMV s’est reverdie depuis sa création en 2007. Ainsi, Google Earth Engine est utilisé pour traiter les images satellites et pour procéder aux différentes analyses. L’indice de végétation par différence normalisée (NDVI) est utilisé pour faire des histogrammes annuels et empilés pour la GMV, des séries temporelles au niveau de la GMV et du Sahel ainsi que des cartes de différences entre l’année 2006, année avant la création de l’Initiative de la Grande Muraille Verte, et 2020 à l’échelle des pays. Le logiciel R est manipulé afin de faire des tests statistiques de significativité des résultats obtenus. Enfin, le logiciel ArcGis Pro est aussi utilisé pour mettre en page les cartes des différences. Une capture d’écran montrant la zone d’étude est proposée dans la partie **Méthodologie** (cf. **Figure 2**)

2. Matériel et méthode

2.1 Les programmes et logiciels

Pour la réalisation de ce travail, le programme Google Earth Engine (GEE) a été utilisé, ainsi que le logiciel ArcGis Pro, R et Excel. GEE a été employé pour la réalisation de toute la partie traitement des données satellitaires, alors qu'ArcGIS Pro a été utilisé pour le traitement et la représentation des cartes finales et leur symbologie. Excel a été utilisé pour stocker les données tabulaires et faire les tests statistiques associés. R a été utilisé pour faire les tests statistiques associés aux droites de régression linéaire des séries temporelles.

Le programme GEE a été sélectionné pour effectuer ce travail car il permet d'utiliser directement les bases de données de Google Earth® et d'avoir accès à un catalogue d'images satellites ainsi qu'à des jeux de données géospatiales riches et variées(12). En effet, GEE emmagasine de l'imagerie satellite dans une archive de données publiques qui comprend plus de 40 ans d'images de la planète (12). De plus, ce programme à l'avantage d'utiliser JavaScript qui est un langage de programmation assez simple à utiliser tout en étant efficace pour faire des analyses d'informations géospatiales. Enfin, d'un point de vue plus pragmatique, GEE est gratuit d'utilisation pour la recherche académique et/ou scientifique, ce qui correspond à ce travail de mémoire.

Le logiciel R, avec son environnement RStudio, est utilisé afin de faire des F-tests afin de détecter la significativité des résultats. R et Rstudio sont particulièrement utilisés dans le domaine de la recherche car ils permettent de faire toutes sortes de tests statistiques utiles à la recherche.

L'utilisation du logiciel ArcGis Pro a été nécessaire pour avoir des résultats sous forme cartographique avec une symbologie claire. Ce logiciel permet d'avoir des rendus de qualités et personnalisés.

2.2 Les données

Pour ce travail de mémoire, nous avons utilisé les données et images satellites de Landsat7 et Landsat8 qui sont deux satellites mis sur orbite par la NASA le 15 avril 1999 et le 11 février 2013 respectivement. Les données utilisées pour ce travail sont les données de réflectance de Surface (SR) corrigées « atmosphériquement » (capteur Landsat 7 ETM+, pour Landsat7, et capteur OLI/TIRS pour Landsat8) (13). Etant déjà corrigées « atmosphériquement », ces données sont idéales pour travailler sur la période (1999-2020) et le territoire d'intérêt. Pour toutes ces raisons, ce sont ces données qui ont été choisies dans le cadre de ce travail de mémoire.

Les images venant de Landsat7 ont huit bandes de données (cf. **Annexe : Bandes spectrales Landsat7**). Quatre sont des bandes dans le spectre du visible et le proche infrarouge, deux

bandes sont pour l'infrarouges à ondes courtes, une bande pour l'infrarouge thermique et une bande panchromatique à haute définition. Ici, seules les bandes pour le rouge (B3) et la bande pour le proche infrarouge (B4) ont été utilisées pour créer un indice NDVI (voir plus bas dans le sous-chapitre « **Méthodologie** »). Les bandes utilisées ont une résolution spatiale de 30m/pixel. De plus, les données ont été corrigées « atmosphériquement » par l'utilisation de LEDAPS et ont une évaluation de qualité de pixel (13). Cette dernière permet de créer des filtres, ou masques, ce qui autorise la suppression de certains pixels ayant des valeurs de qualité inutiles pour ce travail. Typiquement, un exemple d'utilisation de cette évaluation de qualité de pixel est la création d'un filtre pour supprimer les pixels recouverts par un nuage ou par l'ombre d'un nuage (cf. sous-chapitre « **Méthodologie** »). De plus, les données possèdent une évaluation alternative de la qualité des pixels (pixel_qa), ce qui donne de meilleurs résultats lors de la détection de nuage et d'ombre de nuage. Cette évaluation alternative a été générée par l'algorithme CFMask (14).

Les images tirées de Landsat8 ont neuf bandes de données (cf. **Annexe : Bandes spectrales Landsat8**). Cinq sont des bandes dans le spectre du visible et du proche-infrarouge, deux sont dans l'infrarouge à ondes courtes (SWIR), une bande panchromatique à haute définition et une bande SWIR (CIRRUS) pour détecter les nuages. Cependant, dans le cadre de ce travail, seules les bandes pour le rouge (B4) et le proche infra-rouge (B5) sont utilisées pour obtenir un indice NDVI (cf. sous-chapitre « **Méthodologie** »). Les bandes ont toutes une résolution de 30m/pixel. Les données ont aussi été corrigées atmosphériquement, mais par LaSRC cette fois. Cependant, les données ont également une évaluation de la qualité des pixels générée par l'algorithme CFMask (15). De plus, les bandes du capteurs TIRS ne sont pas présentées dans ce travail.

La trajectoire de la Grande Muraille Verte au Sénégal a été tracée selon un fichier format shapefile donné par l'Agence Nationale de la Grande Muraille Verte du Sénégal (ANGMVS). Pour le reste du tracé de la GMV, il a été réalisé selon la délimitation présentée dans l'article de Cheikh Mbow (1) tout en gardant la même largeur que le shapefile de l'ANGMVS (voir **Carte 1** et **Figure 2**). Sur la **Carte 1** on voit que la GMV traverse le Sénégal, la Mauritanie, le Mali, le Burkina Faso, le Niger, le Nigeria, le Cameroun, le Tchad, le Soudan, l'Erythrée, l'Ethiopie et Djibouti.

De même pour la délimitation du Sahel, qui s'est faite sur la base de celle présentée dans la *figure 3* de l'article de Cheikh Mbow (1). Les deux tracés ont donc été faits à la main directement sur GEE dans le gestionnaire de couche (layer manager) en essayant de respecter au maximum les délimitations présentées dans cet article. C'est pourquoi, ces délimitations peuvent sembler plus schématiques que celles de l'article de Cheikh Mbow.

Les frontières des pays d'intérêts ont été prises à partir du jeu de donnée Large Scale International Boundary (LSIB), disponible directement sur GEE et produit par The United States Office of the Geographer (16).

2.3 Méthodologie

Ci-après (cf. **Figure 1**), une représentation graphique des différentes étapes menées durant ce travail. La partie Méthodologie sera séparée suivant ce schéma.

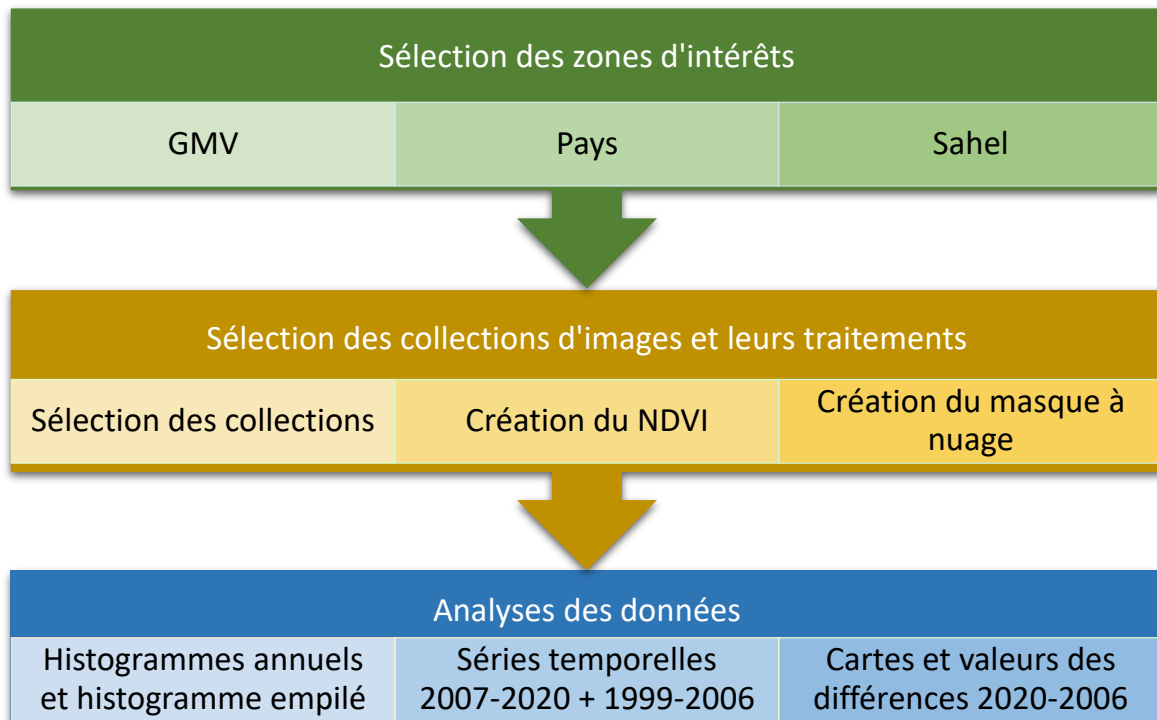


Figure 1 : schéma représentant les différentes étapes de la méthodologie de ce travail

Avant d'exposer toute la méthodologie, il est à noter que tout le code utilisé dans GEE est disponible dans l'annexe (cf. **Annexe**, sous-chapitre **Code GEE**).

2.3.1 Sélection des zones d'intérêts

2.3.1.1 GMV

Pour commencer il a fallu choisir la région d'intérêt. Dans ce travail, la région est celle de la Grande Muraille Verte. Ainsi, la première chose qui a été faite fut de retranscrire le parcours de la GMV dans le layer manager. Pour ce faire, on a utilisé les outils géométriques fournis dans ce layer manager, et la GMV a été dessinée sous forme de ligne. Ensuite nous avons créé une variable qui crée une zone tampon autour de cette ligne en utilisant la commande «`.buffer()`» . La zone tampon fait 20 kilomètres de large.

2.3.1.2 Pays

Il a fallu ensuite avoir une variable représentant chaque pays traversé par la GMV. Pour ce faire, le jeu de données Large Scale International Boundary (LSIB) a été importé. Les frontières de chacun de ces pays ont pu être sélectionnées grâce à la commande «`.filterMetadata()`» et par leur code FIPS à deux lettres (Federal Information Processing Standard). Pour avoir la partie de la GMV de chaque pays, il a fallu utiliser la fonction «`.intersection()`» ce qui permet

bande visible rouge (R) et celle du proche infrarouge (PIR). La formule de cet indice est la suivante(17) :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

Cet indice est particulièrement utilisé pour détecter la quantité ainsi que la qualité (vigueur) des plantes. Un score NDVI est compris entre -1 et +1. Les surfaces avec un score négatif sont celles qui ont une réflectance plus importante pour le R que le PIR. Cela peut être de l'eau, de la neige ou des nuages. Les végétaux absorbent plus le R que le PIR, ainsi leur score sera positif, et plus il est élevé et plus végétation est importante et en bonne santé. Enfin, un score proche de 0 représente un général une surface nue ou une région urbaine, qui reflète autant le rouge que le PIR.

Pour faire notre indice NDVI, il a fallu créer une fonction qui fait la différence normalisée entre la bande du rouge visible (bande3) et la bande du PIR (bande4), et qui retourne une nouvelle bande constituée de cette différence normalisée. Il faut néanmoins faire attention, car les bandes utilisées pour créer l'indice NDVI ne sont correctes que pour Landsat7. En effet, pour créer le NDVI avec des données issues de Landsat8, il faut prendre la bande 4 (rouge) et la bande 5 (PIR).

2.3.2.4 Création du masque à nuage

La prochaine étape fut de créer un filtre, ou masque, pour nuage. Ce dernier sert à enlever tous les pixels d'une image qui sont considérés comme appartenant à un nuage ou à l'ombre d'un nuage. Nous voulons enlever ces pixels car ces derniers faussent nos résultats. En effet, en faisant le NDVI de ces pixels nous obtenons un score qui ne correspond pas à la réalité du terrain, et le véritable score NDVI du territoire se trouvant sous le nuage n'est pas connu. Pour créer ce filtre à nuage, on utilise une bande, appelé « pixel_qa ». Cette dernière n'est pas une bande de longueur d'onde comme les autres, elle contient un score qui permet d'obtenir une évaluation pour chaque pixel. Cette bande contient des informations sous la forme binaire, l'information binaire dans les bandes qa est une traduction de chaînes binaires. Chacun de ces bits équivaut à une information. Certains de ces pixels contiennent une information à eux seuls, alors que d'autres sont par paires pour communiquer une information. Les pixels et leurs informations associées sont visibles dans la **Figure 3**. Cette image est tirée du site de l'USGS (18).

pixel_qa	Pixel quality attributes generated from the CFMASK algorithm.
pixel_qa Bitmask	<ul style="list-style-type: none"> • Bit 0: Fill • Bit 1: Clear • Bit 2: Water • Bit 3: Cloud Shadow • Bit 4: Snow • Bit 5: Cloud • Bits 6-7: Cloud Confidence <ul style="list-style-type: none"> ◦ 0: None ◦ 1: Low ◦ 2: Medium ◦ 3: High

Figure 3 : Bits de la band qa, image tiré de la fiche d'information sur « USGS Landsat 7 Surface Reflectance Tier 1 » disponible dans GEE

Ici, nous nous intéressons aux nuages et à leurs ombres. Ce sont donc les bits 3, 5 et la paire 6-7 qui nous intéressent.

On va créer une fonction qui sélectionne la bande « pixel_qa », et qui va générer une nouvelle variable avec tous les pixels dont le bit 5 est égal à 1 ET dont le couple de pixel 6-7 équivaut à 11 ou avec les pixels dont le bit 3 équivaut à 1. La première condition signifie que le pixel est considéré comme un nuage avec une forte confiance, la deuxième condition veut dire que le pixel est considéré comme appartenant à l'ombre d'un nuage. De plus, cette fonction va éliminer les pixels qui ne se trouvent pas dans toutes les bandes, ce qui permet de supprimer les pixels des bords. Finalement, la fonction va prendre chaque image de la collection d'images et va supprimer les pixels appartenant aux nuages et aux ombres de nuage et va également supprimer tous les pixels des bords. Le code JavaScript du masque de nuage se trouve dans les annexes avec le reste du code utilisé dans le GEE.

Maintenant que les fonctions pour ajouter une bande NDVI et un masque qui supprime les pixels problématiques ont été créées, l'analyse des images peut commencer.

2.3.3 Analyses des données

2.3.3.1 Histogrammes annuels et histogramme empilé

On commence par obtenir une seule et unique image, par année, sur la région de la GMV. Chaque image est la moyenne annuelle de la bande NDVI traitée avec le masque à nuage sur le parcours de la GMV. On va ensuite utiliser ces images de moyenne annuelle du NDVI pour faire un histogramme de la GMV par année, afin d'avoir un premier aperçu de l'évolution de cet indice à travers le temps. On utilise la fonction « `ui.Chart.image.histogram()` » qui prend

comme paramètre l'image annuelle, une échelle de pixel en mètre et un nombre maximum de colonne. Ici, l'échelle utilisée est de 300 mètres et le nombre maximum de colonne de 20. On ne peut pas aller à une échelle plus fine par soucis d'efficacité informatique.

On fait également un histogramme empilé des années 2007-2014-2020 afin de montrer l'évolution des valeurs NDVI sur l'ensemble de la GMV à travers le temps. Ce graphique est tracé dans Excel avec les valeurs des histogrammes de 2007, 2014 et 2020 obtenues dans GEE.

2.3.3.2 Séries temporelles

On continue en faisant des séries temporelles. Ces dernières permettent de voir l'évolution de la GMV par pays à travers le temps. Le but d'utiliser ces séries temporelles est de voir si la GMV se développe dans tous les pays (ou pas) et quelles sont les différences entre ces évolutions. Pour faire une série temporelle, il faut utiliser la fonction « `ui.Chart.image.series()` », qui prend comme paramètre une collection d'images, une région sur laquelle faire les calculs, une opération à faire sur la région prédéfinie (appelé un « reducer »), une échelle en mètre, et une propriété qui sera le label pour chaque image sur l'axe des X de la série temporelle.

Dans notre cas, la collection d'images est celle de base, à savoir la collection d'images de Landsat7 sur laquelle on a utilisé le masque de nuage et la fonction pour avoir la bande NDVI, mais on ne va sélectionner que la bande NDVI pour faire la série temporelle. Les régions sont les différentes variables représentant la GMV par pays que l'on a créé au début. Le « reducer » est la moyenne, l'échelle est de 300 mètres et la propriété est le temps de départ de l'analyse, à savoir 01.01.2007.

Certaines options ont été rajoutées afin d'obtenir un graphique plus lisible et compréhensible, comme rajouter un titre, un nom aux axes, etc... Le détail de ces options se trouve dans le code en **Annexe**.

Les séries temporelles ont été faites pour la GMV par pays mais également par région du Sahel par pays. Enfin, que cela soit pour la GMV ou pour le Sahel, deux groupes de séries temporelles ont été produites. L'une qui va du 01.01.1999 au 31.12.2006, et la seconde du 01.01.2007 au 31.12.2020. Si on a séparé ces deux périodes c'est pour voir l'influence de la création de la GMV sur le Sahel et sur la région traversée. Comme le projet de la GMV a débuté en 2007, il est judicieux d'avoir une droite de régression linéaire de la valeur moyenne du NDVI avant le début de la GMV (1999-2006) et une droite de régression linéaire après le début de ce projet (2007-2020). Nous n'avons malheureusement pas pu prendre les données avant 1999. En effet, il y avait trop de données manquantes sur cette région d'Afrique, ce qui ne permettait pas d'avoir une bonne couverture d'images satellites, notamment avec Landsat5 ou Landsat7. Finalement, nous obtenons les séries temporelles pour la GMV par pays pour 1999-2006 et pour 2007-2020 et de même pour les régions du Sahel par pays.

Des modèles linéaires sont ensuite créés dans le logiciel R sur la base des séries temporelles afin de trouver, ou non, une significativité des résultats. Pour faire ces modèles linéaires, il a fallu télécharger les résultats des séries temporelles dans Excel, puis « mettre en page » ces

données afin de pouvoir les exploiter dans R. Tous les modèles linéaires sont sous la forme de : $lm(\text{Date} \sim \text{ValeurNDVI})$, soit le modèle linéaire de la variable du temps (en X) en fonction de la variable NDVI (en Y). Le logiciel retourne une p-value associé au F-test effectué. Si la p-valeur est inférieure au seuil 0.05, alors on rejette l'hypothèse nulle et on admet que le résultat de la série temporelle est significatif. La droite de régression de la série temporelle est justifiée.

2.3.3.3 Cartes et valeurs des différences 2020-2006

Après avoir obtenu ces résultats, nous voulons examiner les différences de valeur NDVI entre 2006, avant le lancement de la GMV, et 2020, l'année la plus récente, afin de mettre en évidence l'effet de la GMV. De plus, des cartes ont été produites pour indiquer dans quelles zones il y a eu des changements, positifs comme négatifs, de la valeur NDVI moyenne par année entre ces deux années, par pays.

Nous avons commencé par sélectionner, parmi notre collection d'images, les images des années désirées, qui se trouvent sur le territoire sélectionné. On y ajoute le masque de nuage et la fonction pour la bande NDVI. On sélectionne uniquement cette bande, puis on en fait la moyenne annuelle.

Il est à noter que, uniquement pour cette partie du travail, pour l'année 2020, ce sont des images Landsat8 qui ont été utilisé car elles sont de bien meilleures qualités que celles de Landsat7. En effet, le satellite Landsat7 a connu des anomalies, notamment à partir du 31 mai 2003, date à laquelle le Scan Line Corrector a cessé de fonctionner pour des raisons mécaniques. Il en résulte que les images Landsat7 ne sont pas prises correctement mais en zig-zag ce qui conduit à des images partiellement incomplètes avec des trous en forme de coin. Ce problème fait qu'il y a une perte d'environ 25% de chaque image (19).

Ensuite on crée une variable qui sera la différence entre les images de 2020 et celles de 2006. Ceci veut dire qu'on va soustraire à la valeur NDVI de chaque pixel de 2020, la valeur NDVI de ce même pixel de 2006. On peut ensuite afficher cette variable qui sera une carte du pays où les valeurs négatives indiquent une diminution du NDVI alors que des valeurs positives indiquent une augmentation de cet indice. On fait la même démarche pour chaque pays.

Enfin, on veut obtenir les valeurs moyennes annuelles du NDVI de 2006 et de 2020 pour 1) les pays, 2) région du Sahel par pays et 3) la GMV par pays. On va ensuite comparer les valeurs de 2006 à 2020.

Pour 1) : On prend nos variables de NDVI 2006 et 2020 par pays et on applique la fonction « `.reduceRegion()` » qui permet d'attribuer une opération sur toute une région. Le but étant d'avoir une valeur moyenne NDVI pour tout le pays, on utilise l'opération (appelé `reducer` dans le code GEE) « `ee.reducer.mean()` ». Ce `reducer` va faire la moyenne de tous les pixels contenus dans le pays afin d'obtenir une seule valeur représentant le NDVI moyen du pays. Il faut également donner comme paramètre de la fonction, le nombre de pixels maximum traités et l'échelle à laquelle va travailler la fonction. Le maximum de pixel est de 10^{11} et l'échelle est de 300 mètres. La différence entre les deux valeurs est calculée dans un tableau Excel (cf. **Tableau**

1). Un test de Shapiro-Wilk ainsi qu'un diagramme de quantile-quantile est utilisés afin de déterminer si les données sont distribuées normalement. Enfin, un test-t pour échantillons appariés (Paired Samples t-Test) est mené pour s'assurer que les valeurs sont significativement différentes entre les deux années considérées.

Pour 2), on va couper les images de 2006 et 2020 afin de n'avoir que les parties d'images se trouvant dans le Sahel avec la fonction «`.clip()`». Ensuite, ce découpage sera la variable sur laquelle sera appliquée la fonction «`.reduceRegion()`». Les mêmes paramètres sont effectués qu'avec 1). On obtiendra la valeur NDVI moyenne de 2006 et 2020 pour la région du Sahel dans chaque pays. La différence entre ces deux valeurs est également calculée dans un tableau Excel (cf. **Tableau 2**). Comme pour 1), on utilise le test de Shapiro-Wilk et le diagramme de quantile-quantile pour s'assurer de la distribution normale des données. Un test-t pour échantillons appariés est également mené pour sur données.

Pour 3), on fait les mêmes manipulations qu'avec 2) mais avec la GMV. La différence entre ces résultats est à son tour calculée dans Excel (cf. **Tableau 3**). Le test de Shapiro-Wilk et le diagramme quantile-quantile sont de nouveau utilisés mais cette fois c'est un test des rangs signés de Wilcoxon (Wilcoxon signed rank test) qui sera appliqué pour s'assurer de la significativité des résultats car les données ne sont pas distribuées normalement. Ce test est la version non-paramétrique du t-test pour échantillons appariées.

Les cartes des différences entre les valeurs NDVI annuelles moyennes 2006-2020, ont été exportées dans un compte Google Drive avant d'être téléchargées dans le logiciel ArcGIS Pro. C'est également le cas pour le tracé de la GMV et du Sahel. Ces deux derniers sont sous le format shapefile alors que les cartes des différences de valeurs moyennes annuelles 2006-2020 ont été exportées sous format raster.

ArcGIS Pro a permis de refaire la symbologie de ces cartes et d'ajouter différents éléments permettant une meilleure lecture de la carte (Titre, légendes, rose des vents, échelle de distance).

Il a fallu d'abord découper les images venant de GEE par un shapefile de la forme du pays sélectionné. Tous les shapefiles de pays utilisés dans ArcGIS Pro proviennent de la base de données GADM (20). Le schéma de couleur des cartes est « Condition number », inversé, ce qui colore les faibles valeurs dans les nuances de rouge et les fortes valeurs en nuances de vert. De plus, le type d'étirement des couleurs se base sur la déviation standard. Il peut y avoir des différences entre les cartes sur le nombre de déviations standards utilisé. Certaines cartes auront huit déviations standards alors que d'autres en ont que quatre. Ces différences s'expliquent par le fait que dans certains pays, il y a des pixels avec des valeurs extrêmes et qui ne sont pas nombreux. Pour éviter que ces pixels extrêmes ne faussent la colorimétrie de la carte, il faut rajouter des déviations standards afin de « lisser » l'aspect des cartes. Toutes les cartes sont dans la partie **Résultats ; Cartes des différences du NDVI**.

3. Résultats

3.1 Région d'intérêt

La région d'intérêt de cette étude est visible dans la partie Méthodologie (cf. **Figure 2**). Le Sahel figure en jaune dans la capture d'écran du Layer manager de GEE et le tracé noir représente celui de la GMV.

3.2 Histogrammes

Ci-dessous figurent les histogrammes de la GMV, par année. En abscisse, les valeurs de l'indice NDVI, et en ordonnée, le nombre de pixels (300x300 mètres). Ici ne seront présentés que trois histogrammes (2007, 2014, 2020), pour montrer l'évolution des valeurs NDVI à travers la période considérée. Tous les histogrammes sont consultables en annexe (cf. **Annexe ; Histogrammes**). Les colonnes avec le plus grand nombre de pixel indiquent les valeurs NDVI dominantes, et par extension le type de végétation associé qu'on retrouve le plus dans cette région.

Histogramme du NDVI de la GMV 2007

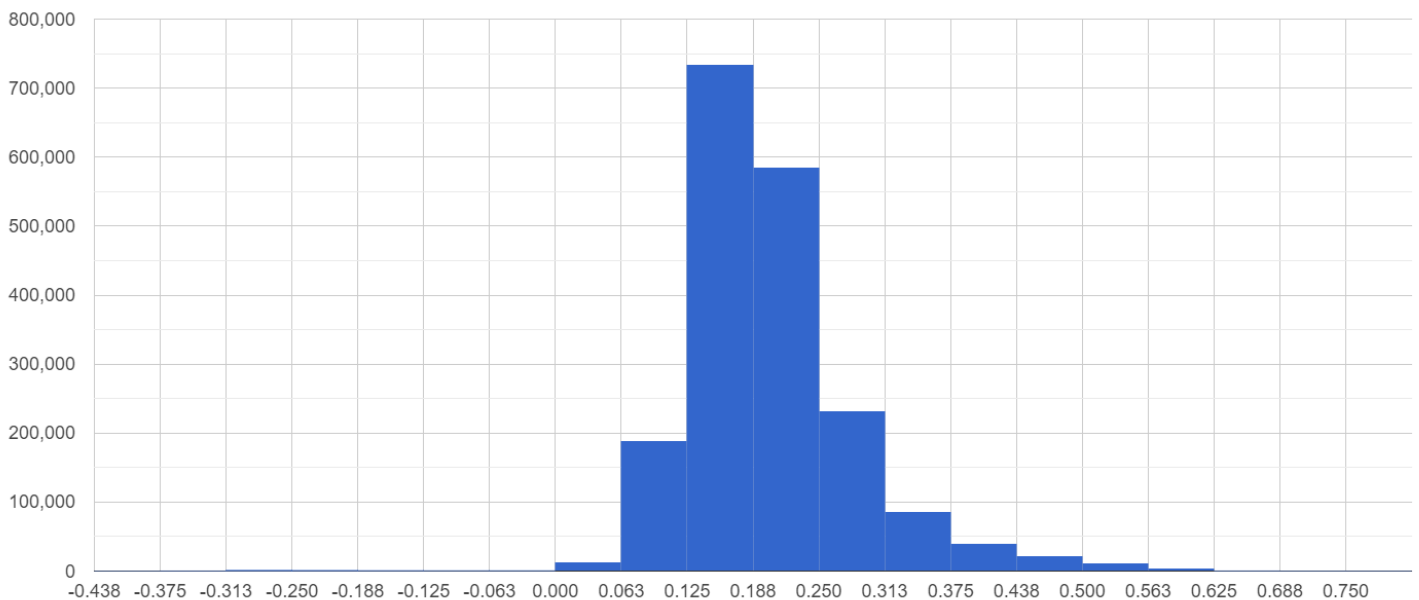


Figure 4 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2007. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.

Le plus grand nombre de pixels se trouve dans la classe de valeur 0.125-0.188 puis dans la classe 0.188-0.250.

Histogramme du NDVI de la GMV 2014

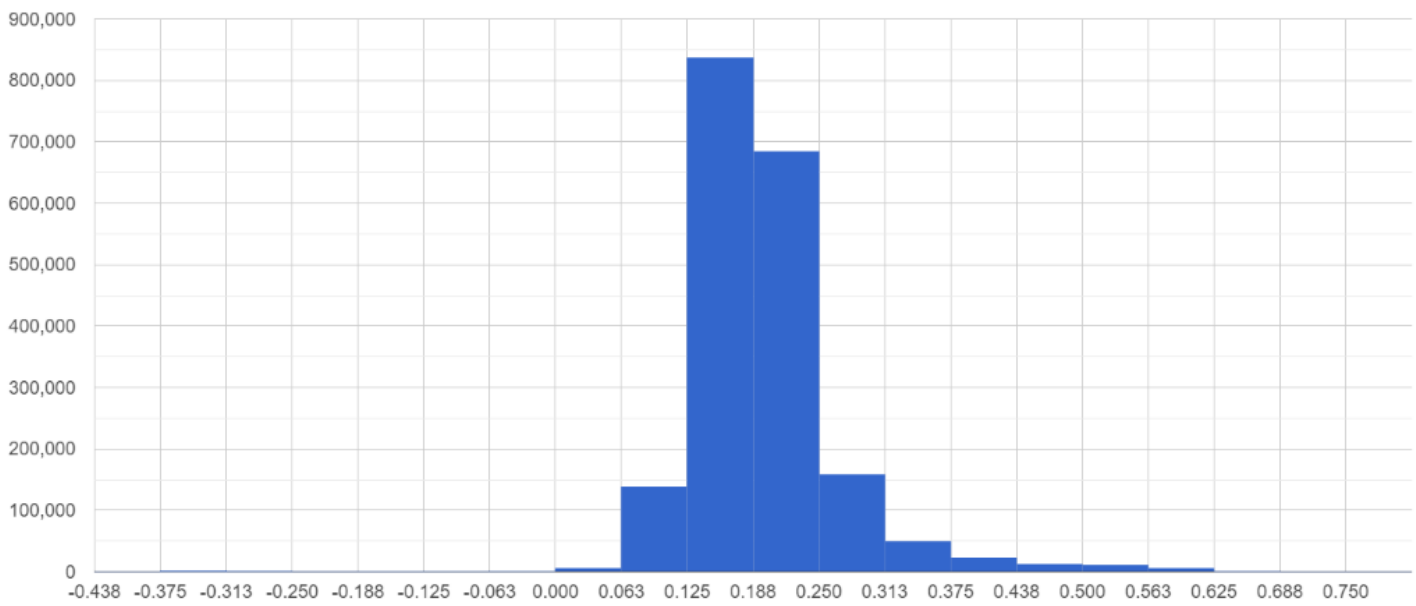


Figure 5 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2014. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.

On observe une diminution du nombre de pixels dans les valeurs les plus extrêmes et une augmentation du nombre de pixels dans les classes médianes (0.125-0.188 / 0.188-0.250).

Histogramme du NDVI de la GMV 2020

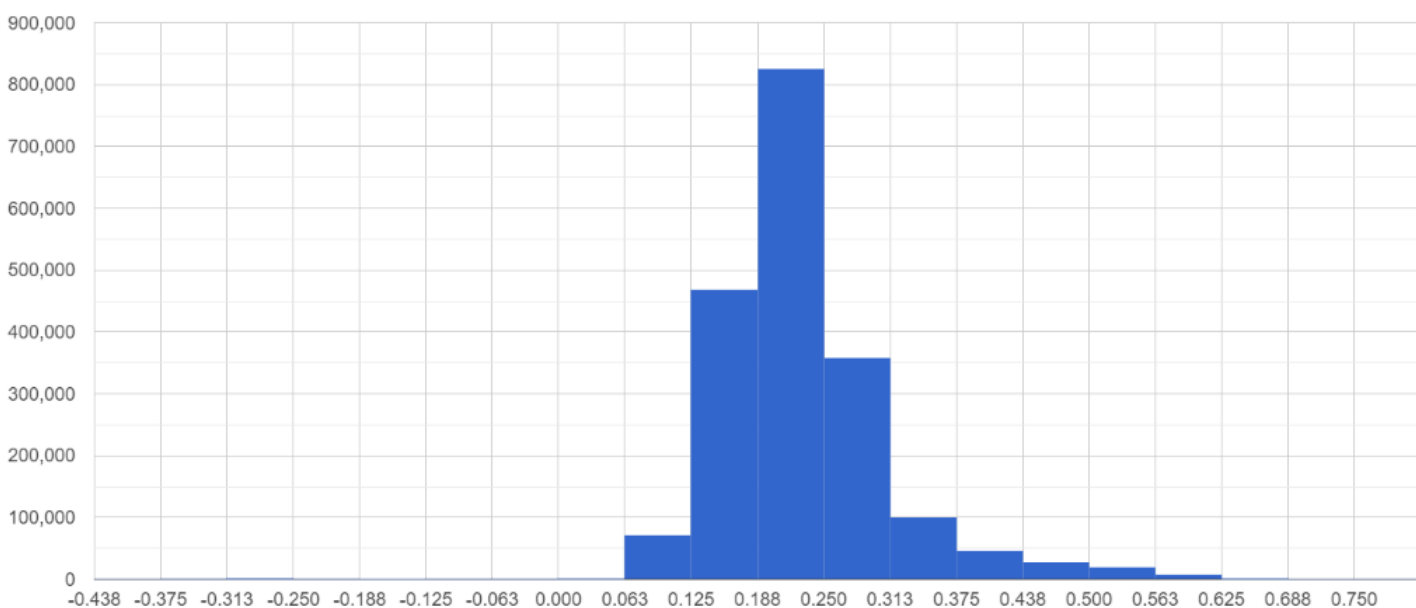


Figure 6 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2020. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.

On observe une nette augmentation du nombre de pixels dans la classe 0.188-0.250 et la classe 0.250-0.313, au détriment de la classe 0.125-0.188. Il y a un décalage progressif du nombre de pixels vers les valeurs élevées.

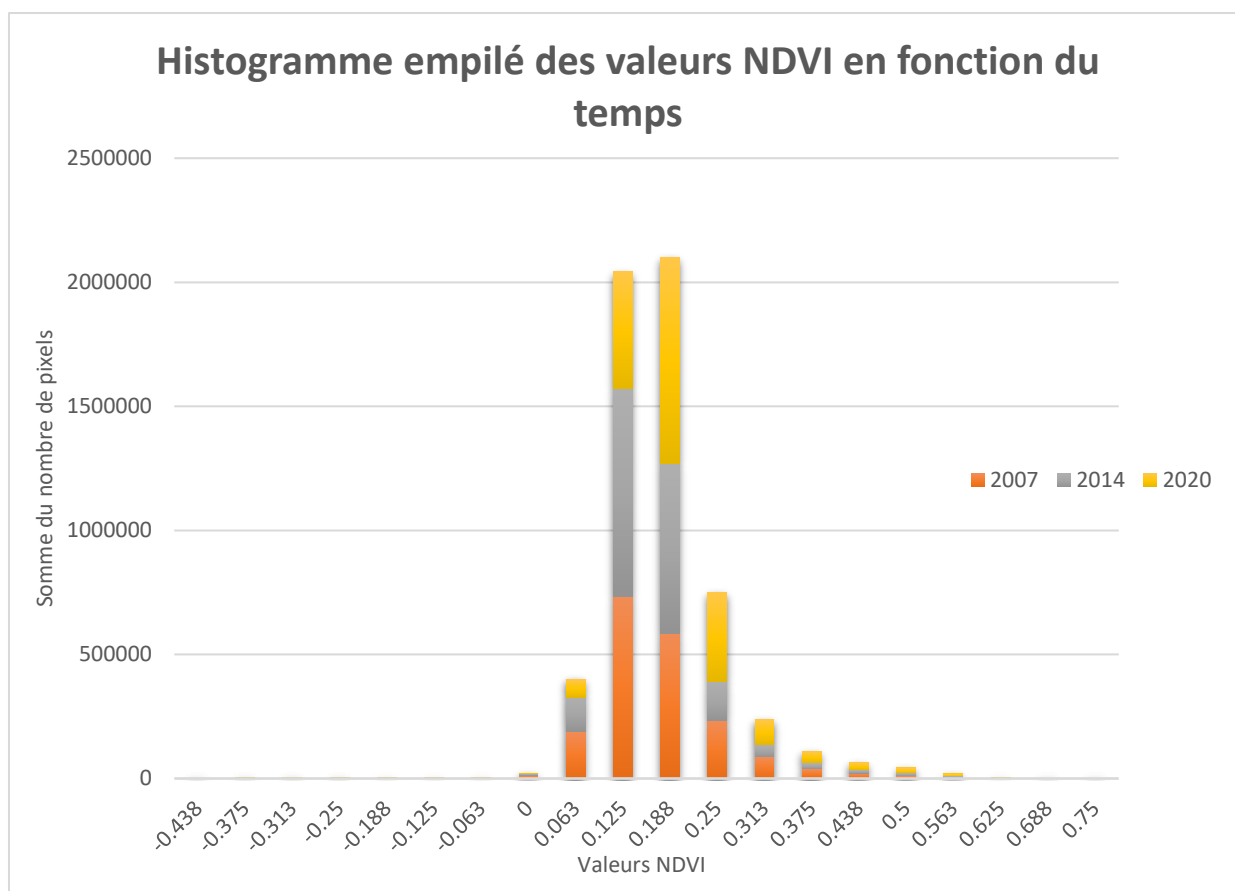


Figure 7: Graphique empilé représentant le nombre de pixels par valeur NDVI pour les années 2007, 2014, 2020

L’histogramme empilé permet de comparer plus facilement les trois années mentionnées précédemment. On remarque que le nombre de pixels se déplace vers des valeurs plus importantes à travers le temps. Les valeurs les plus basses (<0.125) se raréfient alors que les valeurs les plus importantes (≥ 0.25) deviennent plus fréquentes. On remarque tout de même que les valeurs entre 0.123 et 0.188 sont les plus abondantes pour toute la période considérée. On pourrait traduire cela par une augmentation de la végétation, ou par une végétation qui devient plus verte à travers le temps, ce qui revient à un changement de type de végétation.

3.3 Séries temporelles

Une sélection de séries temporelles est exposée ci-dessous. Nous ne prenons qu’un seul pays comme exemple, le Sénégal, car cela prendrait trop de place à afficher toutes les série temporelles (il y en a quatre par pays qui se trouvent toutes en annexe (**Annexe ; Séries temporelles**)). Nous présentons d’abord les séries temporelles pour la GMV par pays, puis le Sahel par pays. Les séries temporelles sont regroupées par pays. Une droite de régression linéaire (en violet) est superposée à ces graphiques. Les données elles-mêmes sont affichées en vert. En abscisse figure le temps et en ordonnée la valeur moyenne du NDVI pour la région.

3.3.1 Exemple du Sénégal

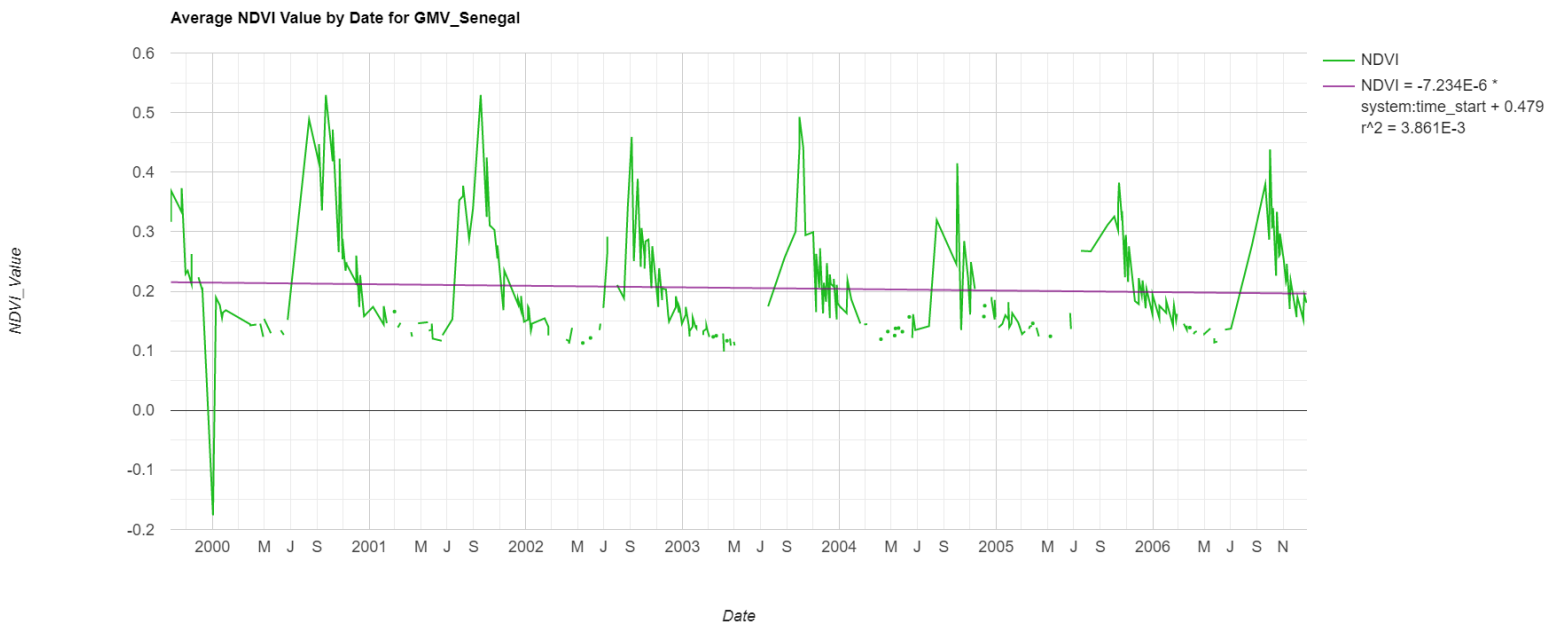


Figure 8 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV au Sénégal.

On observe une droite de régression linéaire qui diminue. Le R^2 est de 3.861×10^{-3} . Il y a également une valeur qui semble être une erreur dans les données Landsat, en janvier 2000.

Average NDVI Value by Date for GMV_Senegal

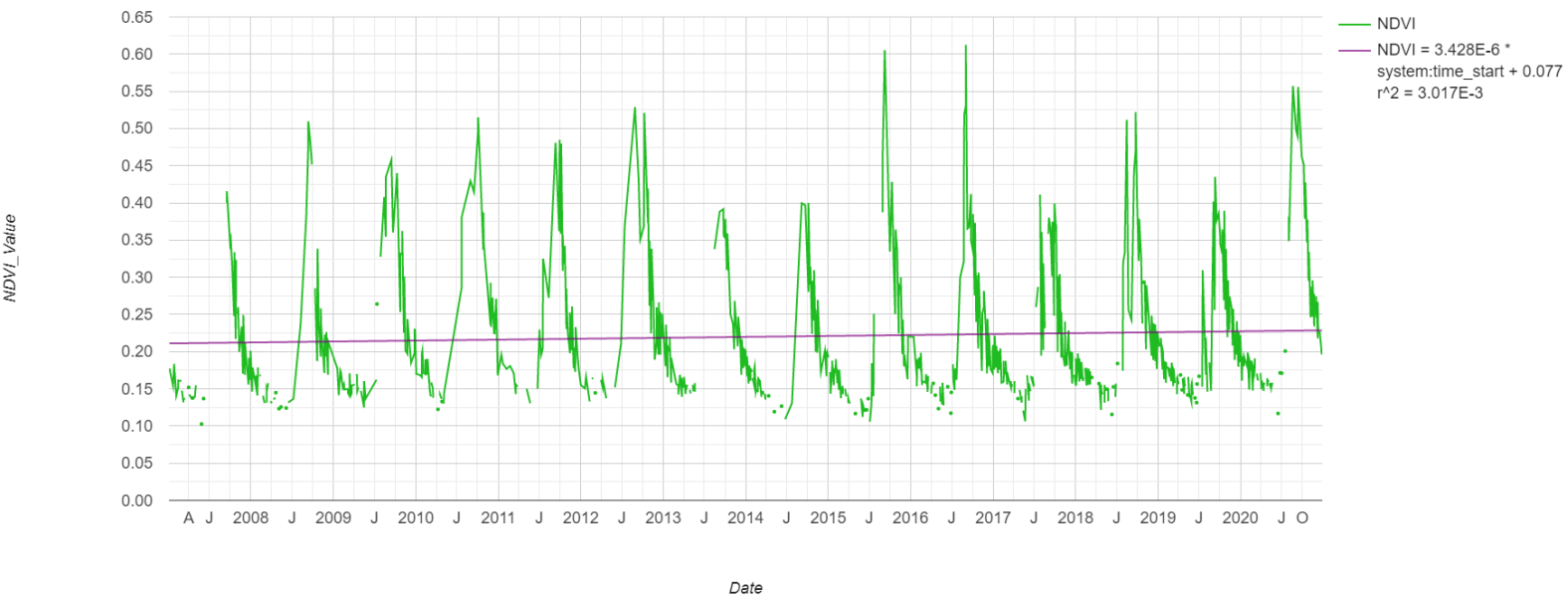


Figure 9 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV au Sénégal.

On remarque que la droite de régression linéaire augmente à travers la période considérée. Il n'y a aucune valeur extrême. Le R^2 est de 3.017×10^{-3} .

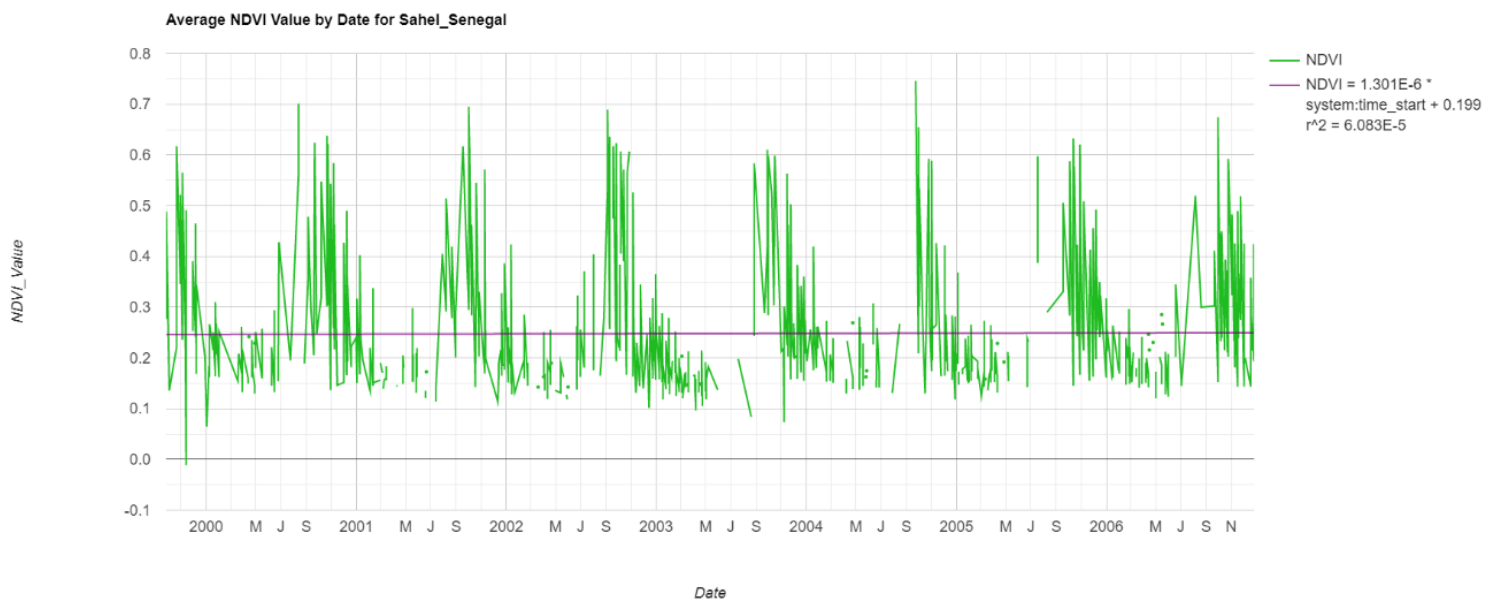


Figure 10 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel au Sénégal.

On observe une droite de régression linéaire qui stable à travers le temps. Le R^2 est de 6.083×10^{-5} .

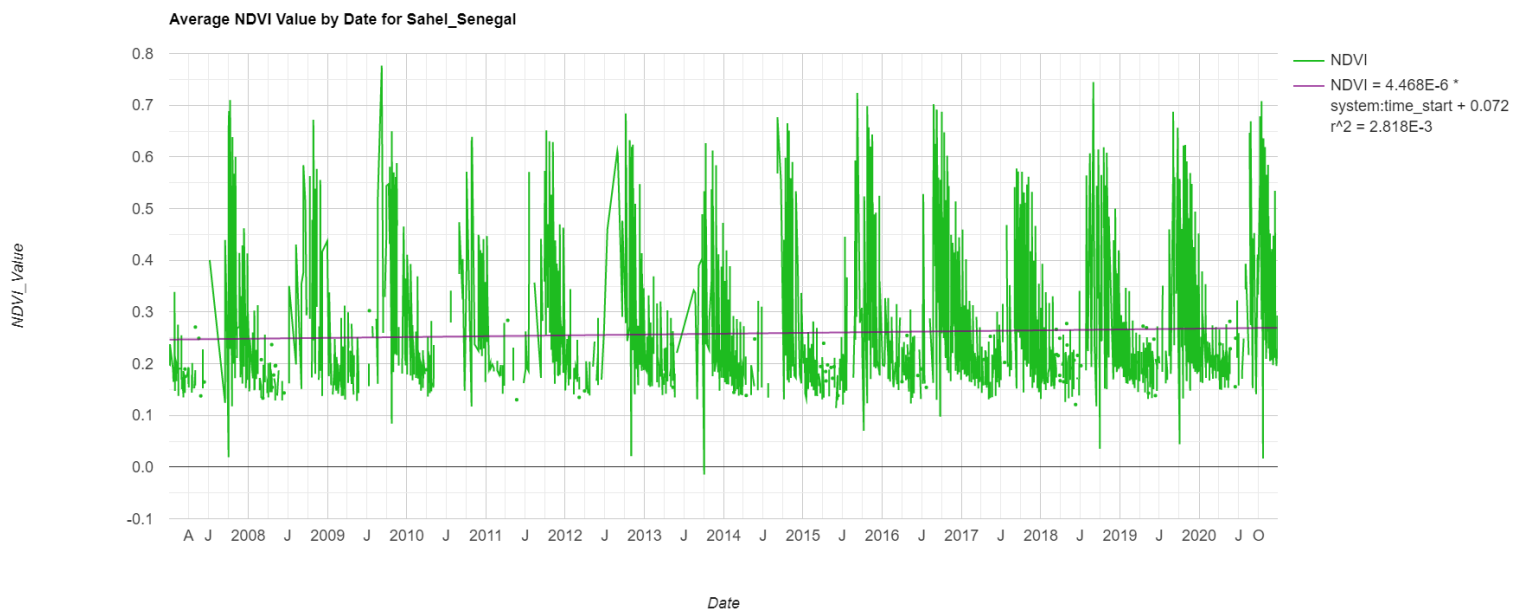


Figure 11 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le Sahel au Sénégal

La droite de régression linéaire augmente légèrement au fil du temps et le R^2 est de 2.818×10^{-3} .

On peut remarquer, pour la GMV, que seul Djibouti a une droite de régression linéaire qui augmente pour la période 1999-2006 (cf. **Annexe, Figure 64**). Pour tous les autres pays, pendant cette période, l'indice NDVI moyen tendait à diminuer. Ceci peut se traduire par une

perte de végétation sur l'ensemble du parcours de la GMV, ou à un remplacement de la végétation par une végétation plus sèche et moins verte. En revanche, pour tous les pays, la droite de régression linéaire augmente pour la période 2007-2020.

Pour le Sahel, les différents pays ont des tendances diverses. Ainsi, pour la période 1999-2006, le Niger et la Mauritanie sont les seuls pays à avoir leurs droites de régression linéaire qui augmentent. Le Sénégal, et le Mali sont les deux pays dont la droite de régression linéaire stagne durant cette période et tous les autres pays voient cette courbe diminuer. Par contre, pour la période 2007-2020, tous les pays ont leurs droites de régression linéaire qui augmentent.

Les résultats des modèles linéaires associés aux séries temporelles se trouvent en **annexe** (cf. **Annexe, Tableaux des p-values des séries temporelles, Tableau 6**). Pour le Sénégal, seule la série temporelle du Sahel entre 2007-2020 est significative.

Pour la GMV en 1999-2006, seuls le Cameroun, le Soudan et Djibouti ont leurs résultats qui sont significatifs. Pour la période 2007-2020 le Sénégal et la Mauritanie sont les deux pays dont les résultats ne sont pas significatifs.

Pour le Sahel, pour la période 1999-2006, la Mauritanie, le Niger, le Nigeria, le Tchad et le Soudan sont les pays qui ont des résultats significatifs alors que pour la période 2007-2020, tous les pays sont significatifs.

3.4 Tableau des différences de NDVI 2006-2020

Voici les résultats tabulaires des différentes valeurs du NDVI pour 2006 et 2020 et de la différence entre ces deux années. Le **Tableau 1** regroupe les valeurs par pays, le **Tableau 2**, la partie du Sahel par pays et enfin le **Tableau 3** la GMV par pays.

Tableau 1 : Tableau des valeurs NDVI par pays pour 2006 et 2020, et de la différence entre ces deux années

Pays	Valeurs 2006 (L7)	Valeurs 2020 (L8)	Différences
Sénégal	0.257978337	0.295008264	0.03702993
Mauritanie	0.090661775	0.111102646	0.02044087
Mali	0.174912661	0.164133618	-0.01077904
Burkina Faso	0.255352807	0.29768628	0.04233347
Niger	0.117544853	0.124849276	0.00730442
Nigeria	0.32882031	0.369689881	0.04086957
Cameroun	0.503769075	0.583332748	0.07956367
Tchad	0.18892663	0.193760297	0.00483367
Soudan	0.127897097	0.162634789	0.03473769
Erythrée	0.124354782	0.177350694	0.05299591
Ethiopie	0.308655514	0.39374452	0.08508901
Djibouti	0.080913829	0.121181435	0.04026761
Moyenne	0.213315639	0.249539537	0.0362239

Les valeurs en rouge, dans la colonne « Différence », sont les plus négatives. En vert dans la colonne « Différence » figurent les pays avec les valeurs NDVI moyennes les plus importantes. L'Éthiopie est le pays avec la plus grande augmentation du NDVI moyen sur l'ensemble de son

territoire alors que le Mali ferme la marche avec l'évolution la plus négative de son NDVI moyen. C'est le seul pays qui a une valeur négative de la différence entre ces deux années.

Le test de Shapiro-Wilk ayant une p-value associé de 0.7024, ce qui indique que les données sont distribuées normalement. Le diagramme quantile-quantile, en **Annexe**, montre cette tendance. Le test-t pour échantillons appariés a une p-value associée de 0.0010, soit inférieure à la valeur limite de 0.05. L'hypothèse nulle disant que les valeurs ne sont pas significativement différentes est réfutée.

Tableau 2 : Tableau des valeurs NDVI par région du Sahel par pays pour 2006 et 2007, et de la différence entre ces deux années

PAYS_Sahel	Valeurs 2006 (L7)	Valeurs 2020 (L8)	Différences
Sénégal	0.237947892	0.266402875	0.02845498
Mauritanie	0.134295523	0.165830664	0.03153514
Mali	0.157846893	0.160309836	0.00246294
Burkina Faso	0.196602957	0.228873025	0.03227007
Niger	0.131068673	0.155084554	0.02401588
Nigeria	0.20550074	0.258106374	0.05260563
Cameroun	0.256770246	0.313406572	0.05663633
Tchad	0.160064548	0.203749187	0.04368464
Soudan	0.168321	0.228721757	0.06040076
Erythrée	0.131754685	0.181342665	0.04958798
Ethiopie	/	/	
Djibouti	/	/	
Moyenne	0.178017316	0.216182751	0.03816543

Comme pour le **Tableau 1**, les valeurs en rouge dans la colonne « Différence » sont les plus faible alors que les valeurs en vert sont les plus positives du NDVI moyen sur la région du Sahel du pays concerné. Dans ce tableau, c'est le Soudan qui présente la différence de valeur entre 2006-2020 la plus positive. A contrario, le Mali a sa part du Sahel qui s'est le moins reverdi entre ces deux années. On peut tout de même constater qu'aucune valeur est négative, ce qui implique que toutes les régions du Sahel ont verdi, au moins un peu, entre ces deux années. L'Ethiopie et Djibouti n'ont pas de valeur car le Sahel ne traverse pas leurs territoires.

Le test de Shapiro-Wilk a une p-value associé de 0.5678, ce qui indique que les données sont distribuées normalement. Le diagramme quantile-quantile se trouve en **Annexe** et montre que les données sont distribuées normalement. Le test-t pour échantillons appariés a une p-value associée de 8.098×10^{-5} , ce qui est inférieure à la valeur limite de 0.05. L'hypothèse nulle disant que les valeurs ne sont pas significativement différentes est réfutée.

Tableau 3 : Tableau des valeurs NDVI pour la GMV par pays pour 2006 et 2007, et de la différence entre ces deux années

PAYS_GMV	Valeurs 2006 (L7)	Valeurs 2020 (L8)	Différences
Sénégal	0.199143336	0.229097313	0.029953976
Mauritanie	0.194354384	0.242379795	0.048025412
Mali	0.184186769	0.153888305	-0.030298464
Burkina Faso	0.170076714	0.211385289	0.041308575
Niger	0.172869548	0.208173986	0.035304437

Nigeria	0.218107114	0.266158286	0.048051172
Cameroun	0.196841612	0.288923584	0.092081972
Tchad	0.167579196	0.219891654	0.052312458
Soudan	0.161031425	0.218192074	0.057160649
Erythrée	0.197108417	0.241963722	0.044855305
Ethiopie	0.22942278	0.293022362	0.063599582
Djibouti	0.105381092	0.138956625	0.033575533
Moyenne	0.183008532	0.22600275	0.042994217

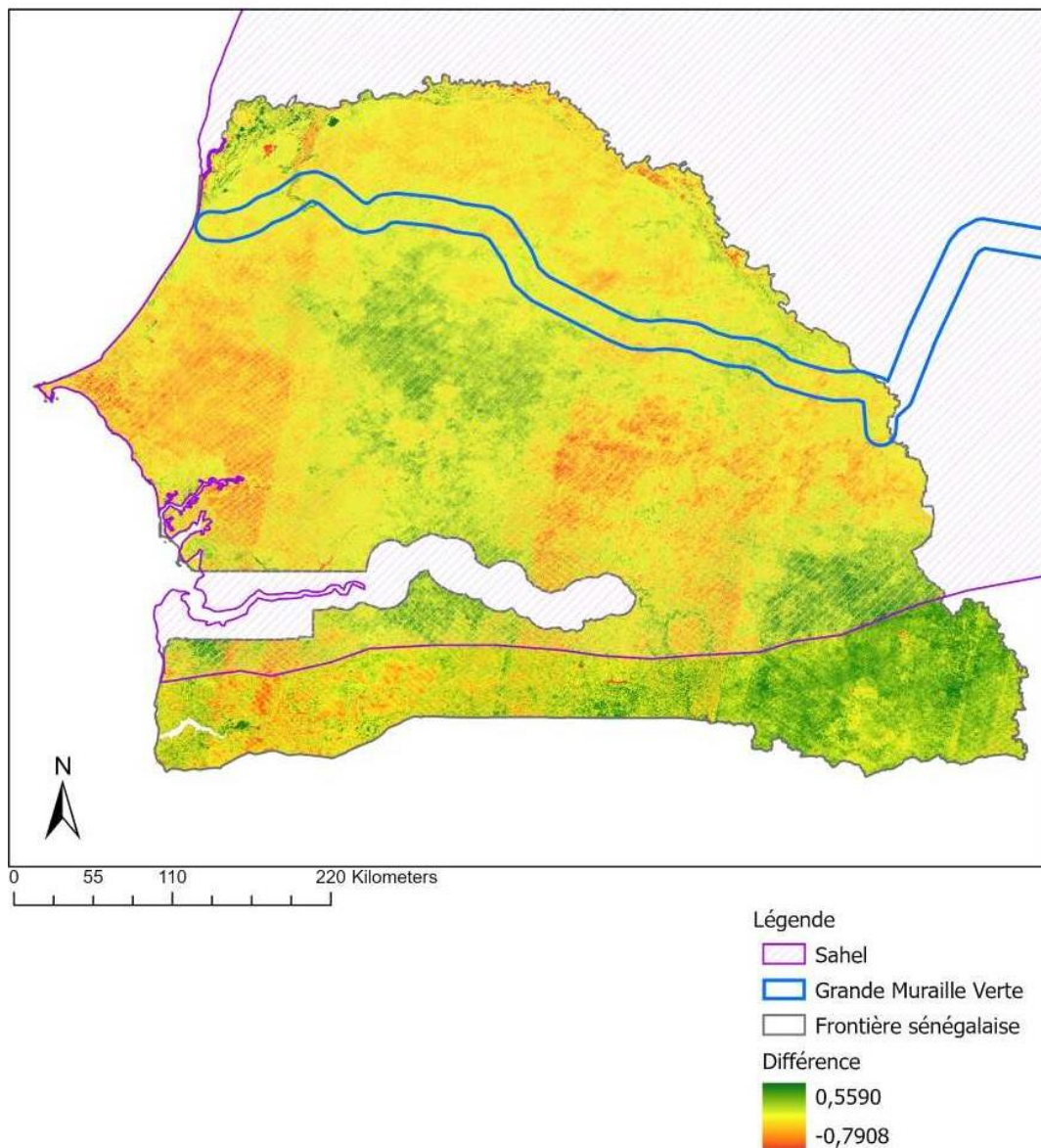
Une fois encore, les valeurs les plus basses des différences de NDVI moyen entre 2006 et 2020 sont en rouges. Les valeurs des différences les plus importantes sont en vertes. On voit que pour la région de la GMV, c'est le Cameroun qui à la valeur la plus positive. En revanche, le Mali a la valeur la plus négative sur sa région de la GMV. C'est le seul pays qui a une valeur négative pour la GMV.

Le test de Shapiro-Wilk a une p-value associé de 0.0438, ce qui est plus petit que la valeur limite de 0.05. Ainsi, on réfute l'hypothèse nulle disant que les données sont distribuées normalement. Le diagramme quantile-quantile, qui se trouve en **Annexe**, montre la même tendance avec des points s'éloignant de la droite. Il a fallu utiliser un test des rangs signés de Wilcoxon dont la valeur W, 2, est inférieure à la valeur, 13, du tableau des valeurs critiques du test de rang signé de Wilcoxon pour une valeur alpha de 0.05. Comme la valeur W est plus petite, on peut réfuter l'hypothèse nulle et affirmer que les valeurs sont significativement différentes entre les années 2006 et 2020.

3.5 Cartes des différences du NDVI

Les cartes des différences du NDVI pour chaque pays entre 2006 et 2020 sont présentées ci-dessous.

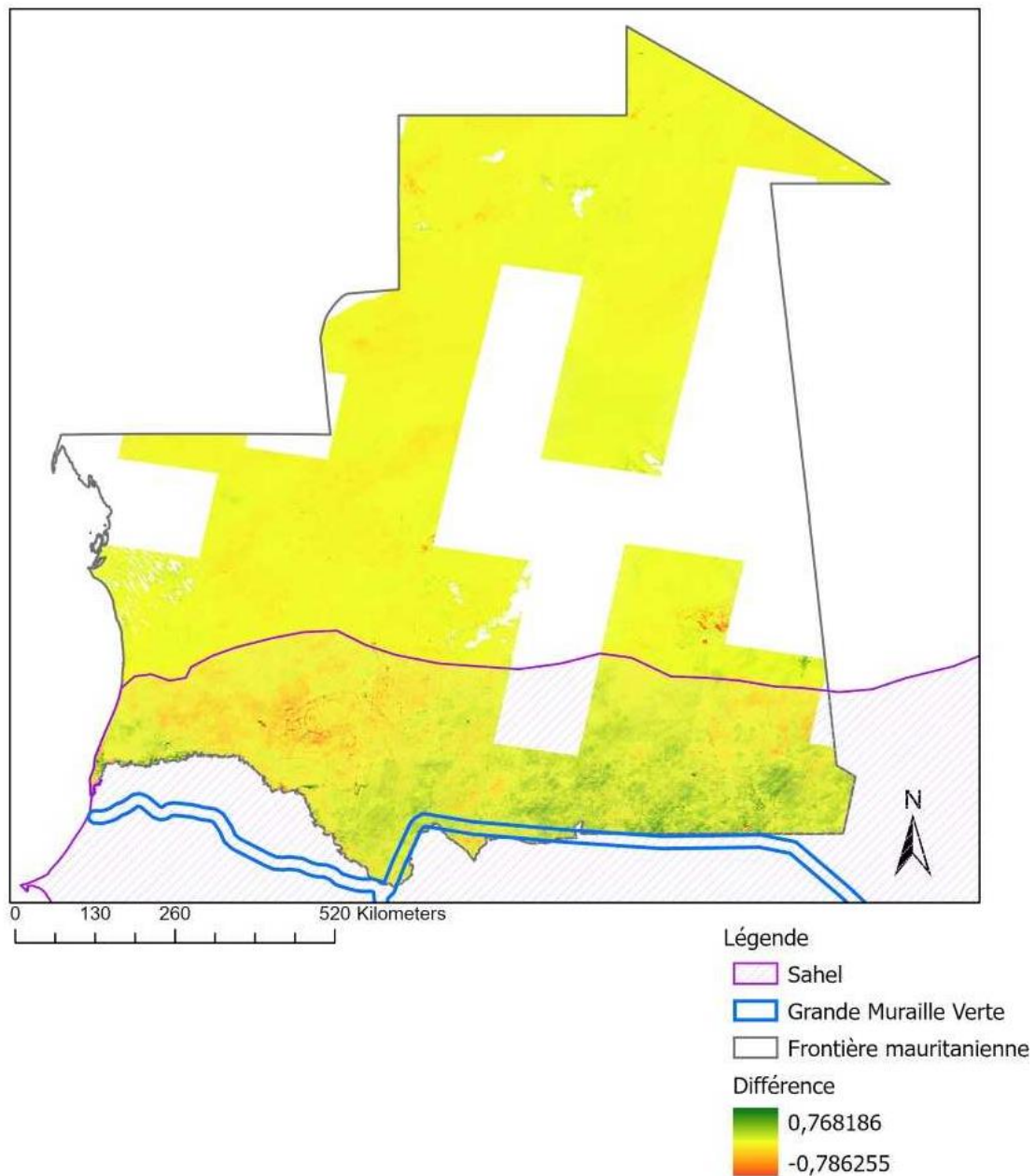
Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Sénégal



Carte 2 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Sénégal.

On voit sur cette carte que la région Sud-Est et la région centrale sont les zones qui ont une valeur NDVI plus importante pour 2020 que pour 2006. En revanche, l'Ouest, une partie du Nord et du centre-Est du pays sont les régions qui ont vu leurs valeurs NDVI baisser entre ces deux années. La région de la GMV, en bleu, oscille entre des zones vertes et des zones tirant dans l'orangé.

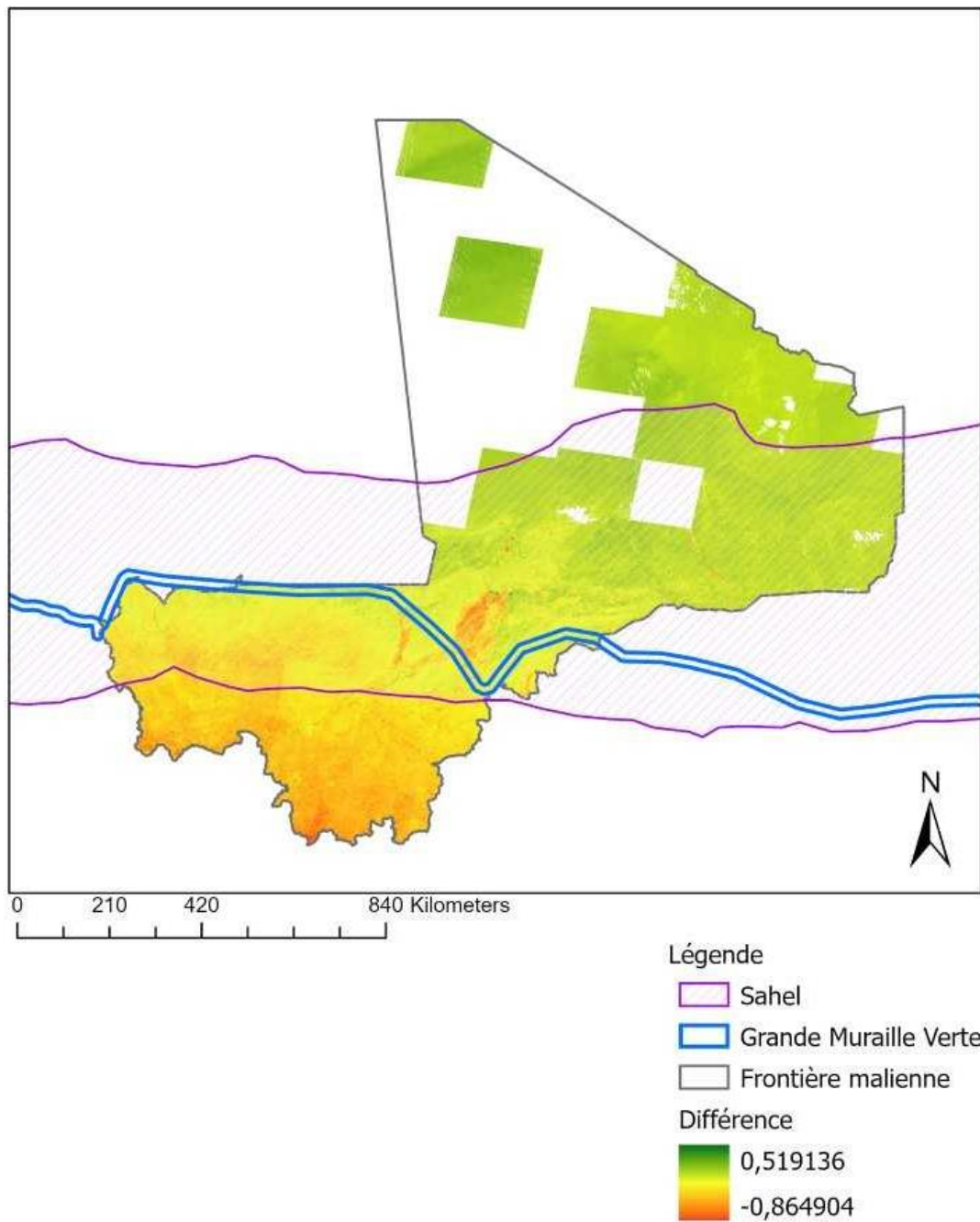
Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Mauritanie



Carte 3 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour la Mauritanie.

On voit qu'une grosse partie du pays n'a pas de changement particulièrement flagrant de la valeur du NDVI entre 2006 et 2020 (région en jaune). Cependant, la partie Sud/Sud-Est du pays présente une différence positive alors que la tendance de la partie Sud-Ouest est plutôt négative. Les quelques régions de la GMV passant dans ce pays ont des valeurs tirant sur le vert, indiquant qu'il y a une augmentation du NDVI entre 2020 et 2006. Il est à noter que les zones blanches correspondent à des régions où il n'y avait pas de données pour 2006. En effet, aucune image pour 2006 n'a été prise par le satellite Landsat7 dans ces zones. Par conséquent la différence des valeurs 2006-2020 n'a pas pu être calculée.

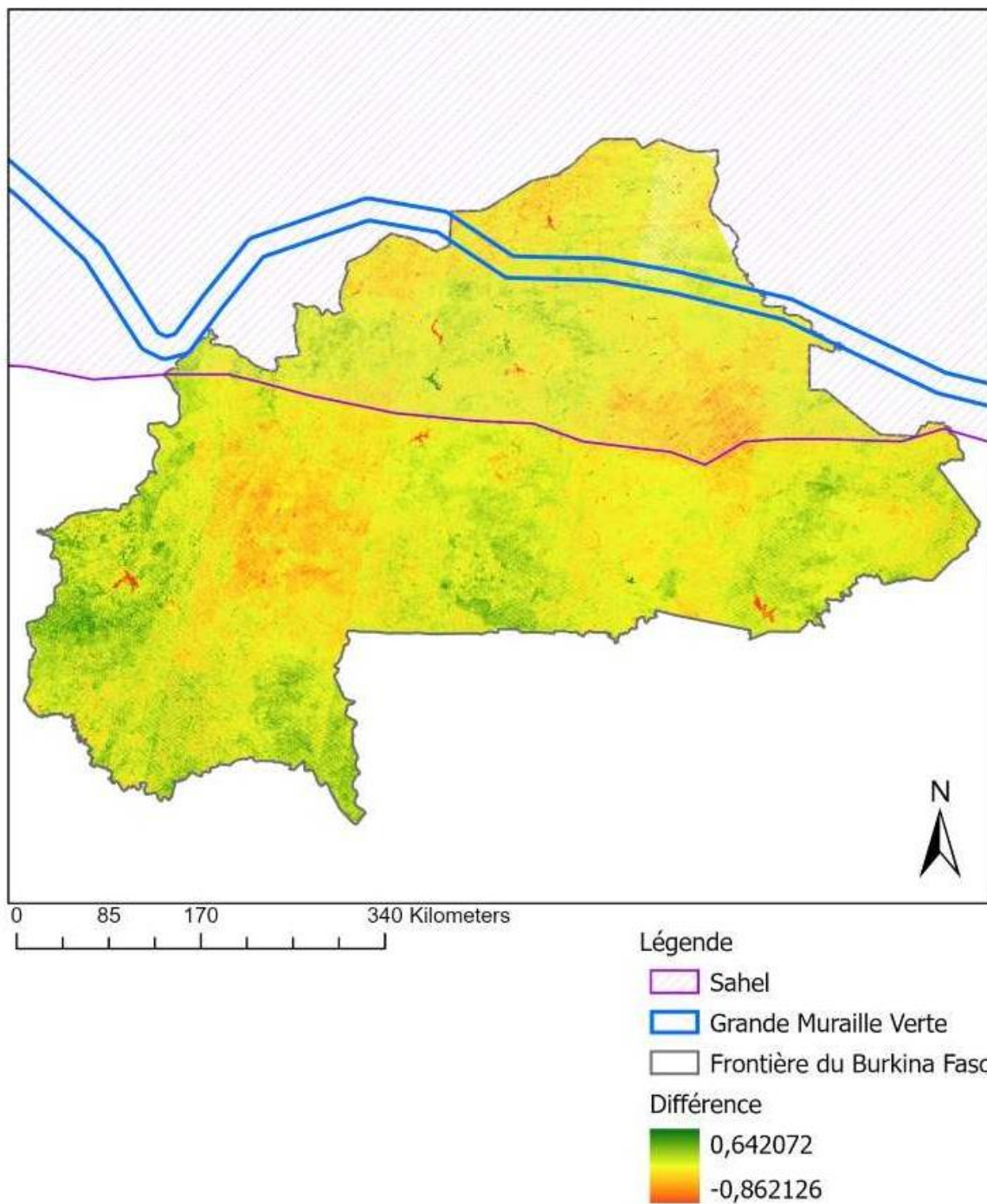
Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Mali



Carte 4 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Mali.

Pour ce pays, on voit une différence Nord-Sud. Le Sud du pays présente des valeurs plus négatives que le Nord. Le cordon de la GMV semble être la « frontière » entre ces deux zones. Cependant, visuellement, la GMV donne l'impression d'être dans des zones jaunes, indiquant un faible changement négatif. Pour ce pays aussi, il y a un manque de données pour l'année 2006 ce qui se traduit par des zones blanches, sans valeurs, dans la partie Nord, Nord-Ouest et Est.

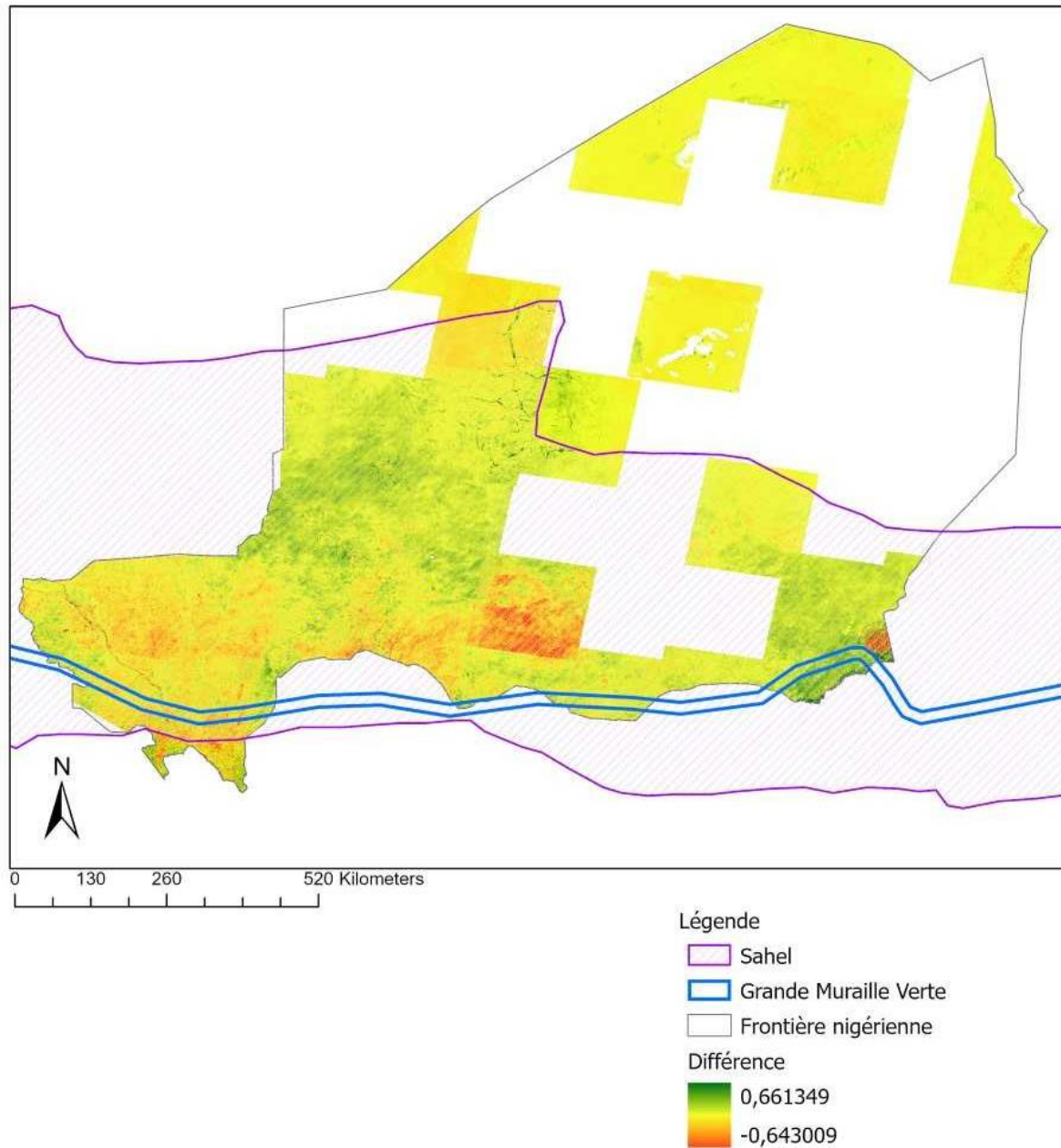
Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Burkina Faso



Carte 5 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Burkina Faso.

Pour le Burkina Faso, la région Sud-Ouest, Sud, Est sont les régions les plus vertes alors que les régions centre-Ouest, centre-Est et Nord sont les régions les plus négatives. Pour la GMV, la partie Ouest semble avoir des valeurs plus négatives que la partie Est.

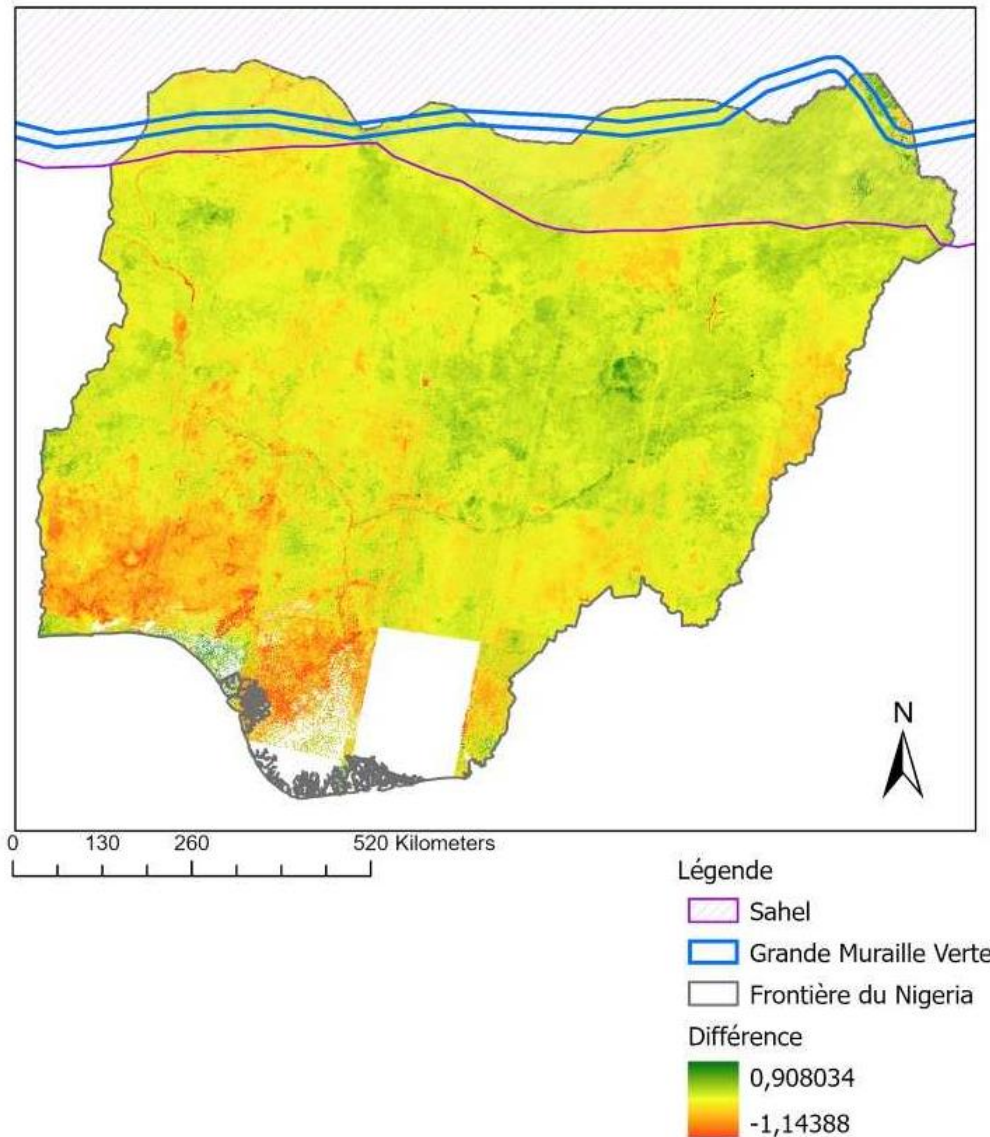
Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Niger



Carte 6 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Niger.

On remarque déjà que pour le Niger, une grosse partie du territoire est sans donnée, surtout dans la région centrale et Est du pays. La région à l'Ouest et au Sud-Est sont les régions avec les valeurs les plus importantes alors que les régions Sud-Ouest, centrale et une partie de la région Sud-Est ont des valeurs négatives tirant sur le rouge. Cette dernière est la région du lac Tchad. La GMV traverse la région orange du Sud-Ouest et jouxte la région du lac Tchad, sans la traverser. Ainsi, certaines de ses régions ont une valeur négative alors que d'autres en ont des positives.

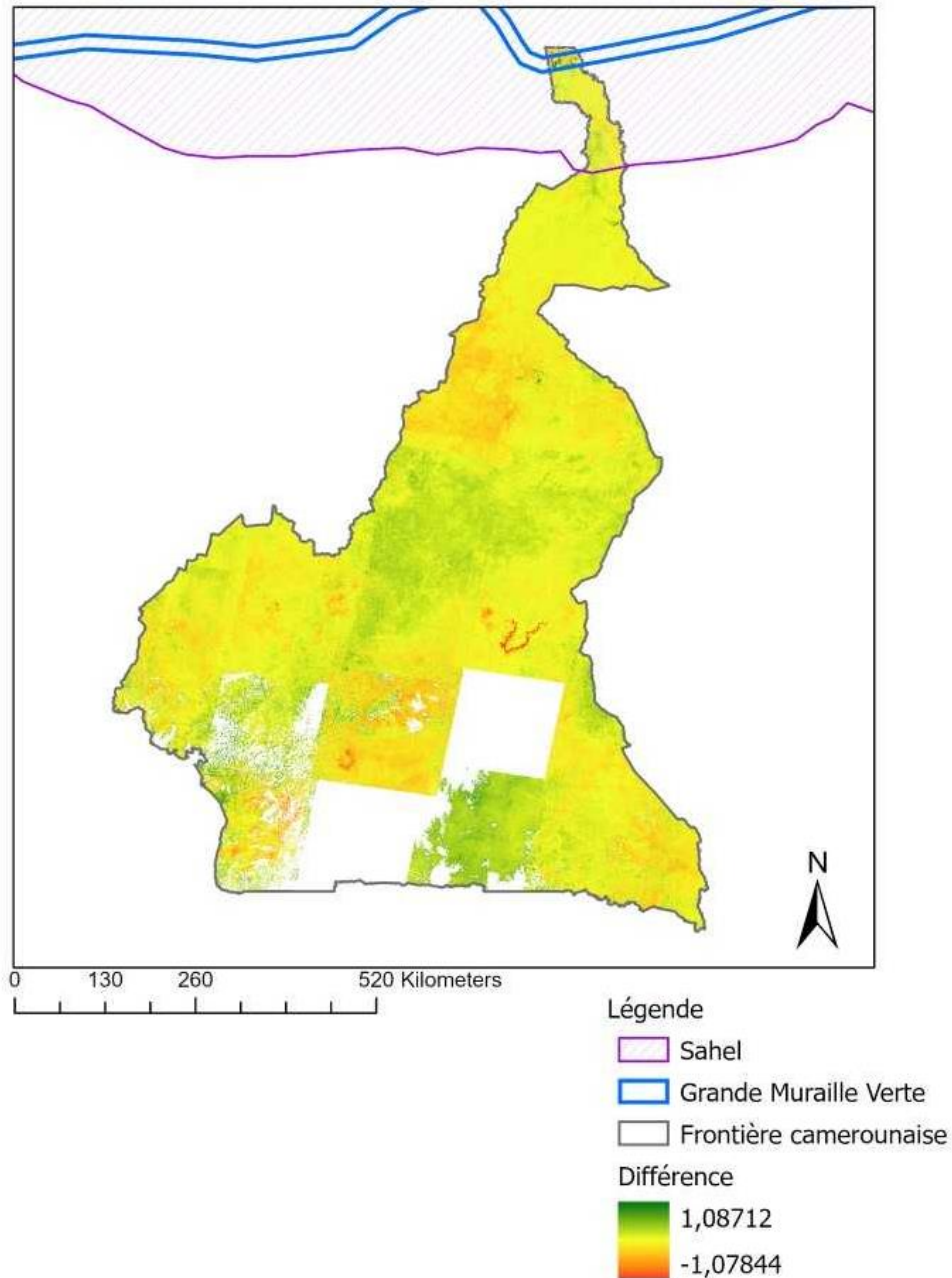
Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Nigeria



Carte 7 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Nigeria.

La carte du Nigeria nous montre un contraste important entre le Nord et le Sud du pays. Si dans le premier cas, les valeurs sont plutôt dans le positif avec des couleurs tirant sur le vert, le Sud du pays montre une tendance tout à fait inverse. En effet c'est dans cette région que se regroupe le plus de zones avec des couleurs rouges-oranges, montrant qu'il y a une diminution de la valeur NDVI moyenne entre 2006 et 2020. Il y a aussi quelques données manquantes dans le Sud du pays. La GMV passe par le Nord du pays, ce qui veut dire qu'elle traverse la région avec les plus hautes valeurs de différence 2006-2020.

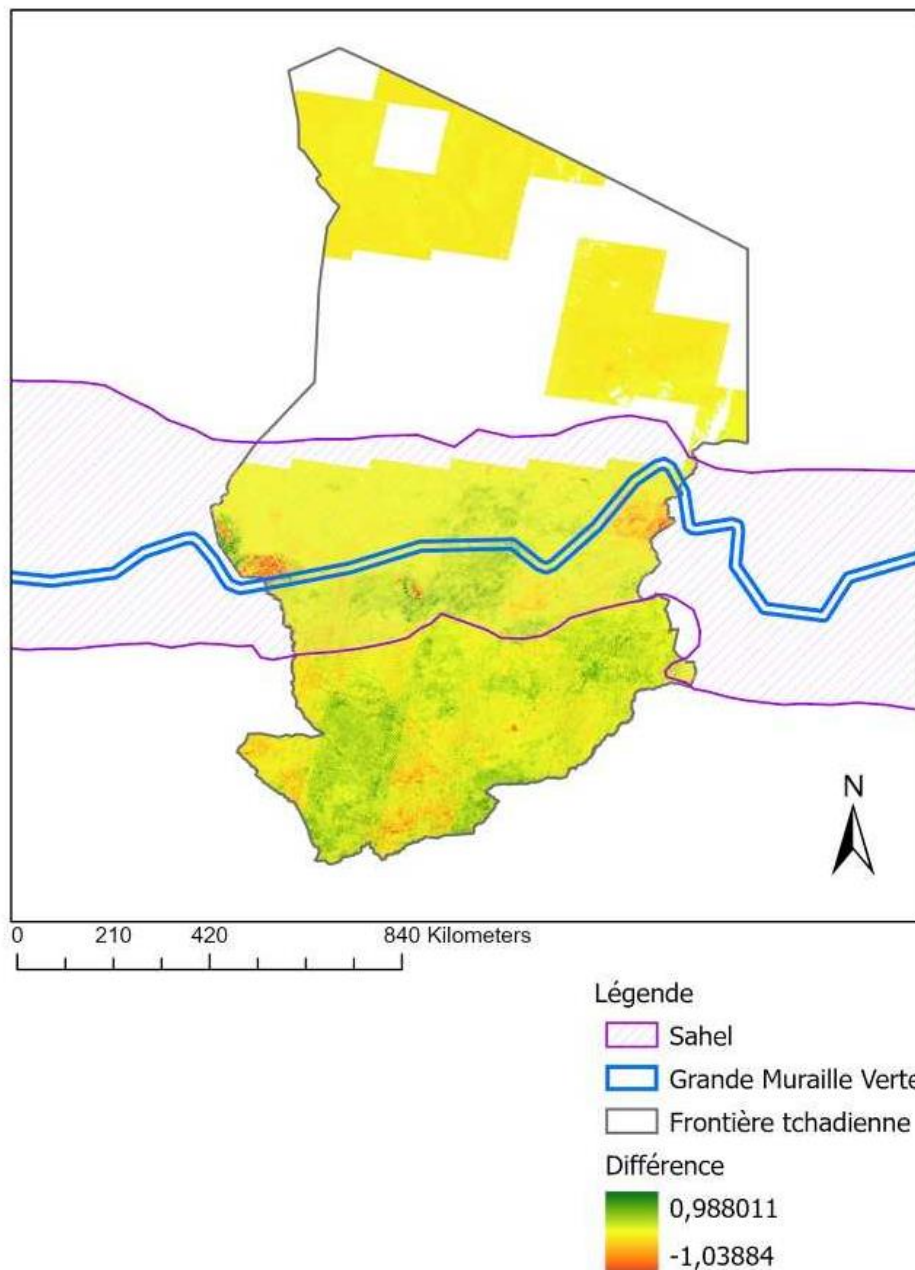
Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Cameroun



Carte 8 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Cameroun.

Pour le Cameroun, on voit qu'il n'y a pas de clivage bien défini dans le pays. Néanmoins on peut remarquer que la région du centre et le Sud regroupent les zones qui sont le plus dans le vert alors que des régions plus au Nord ou entre le centre et le Sud sont plus dans l'orange. Encore une fois il y a des données manquantes, dans le Sud du pays. La GMV passe à l'extrême Nord du pays et dans une zone assez verte ce qui veut dire qu'elle a des valeurs positives.

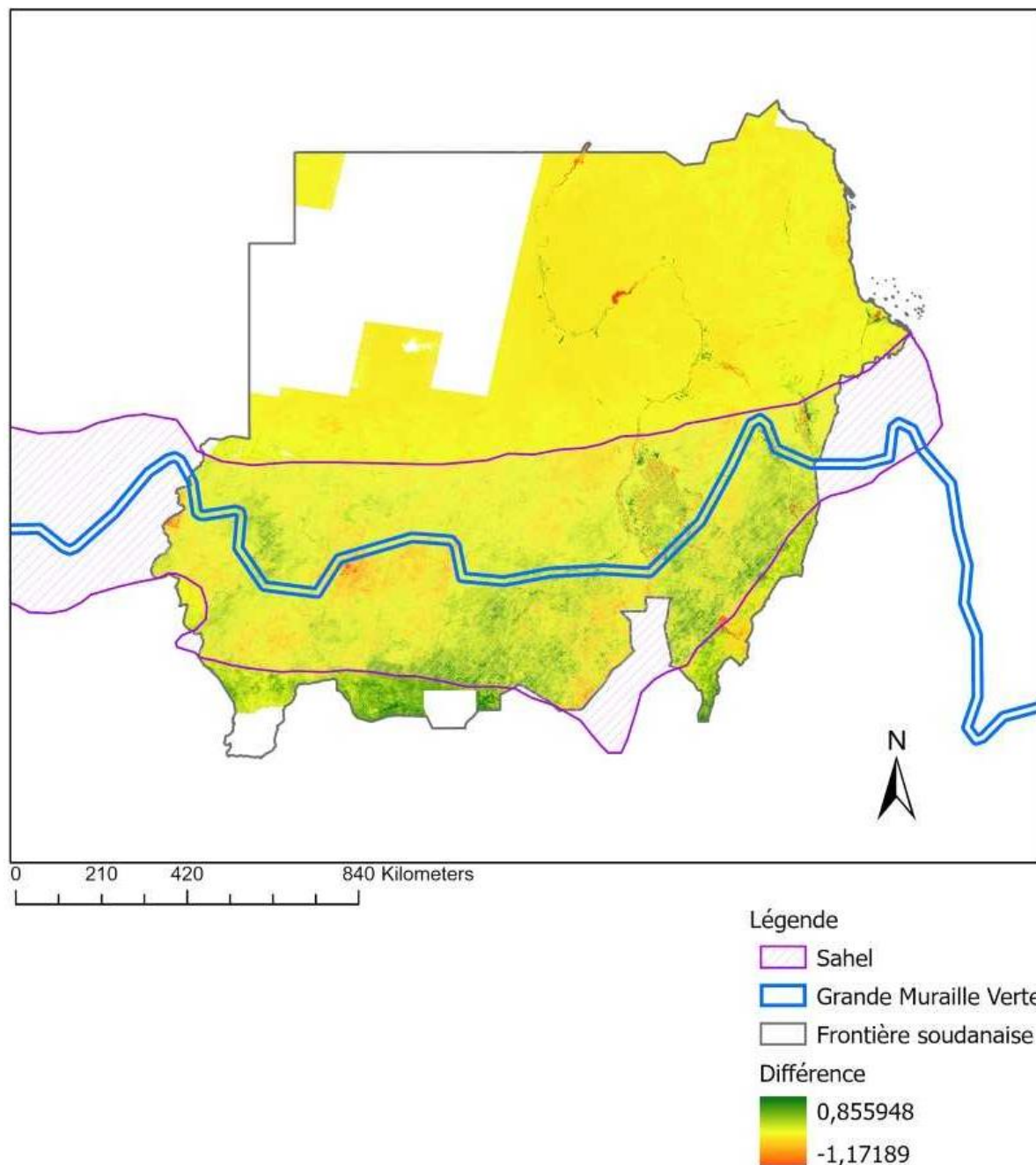
Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Tchad



Carte 9 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Tchad.

Encore une fois, pour une bonne partie du pays, dans sa moitié Nord, il y a un manque de données. Néanmoins on constate que le Sud du pays est relativement vert, indiquant un verdissement de cette région par rapport à 2006. Cependant, deux régions, la première dans l'Ouest du pays et la seconde à l'Est, sont rouges. La région à l'Ouest correspond à la région du lac Tchad. La GMV ne passant pas dans ces zones rouges, a des valeurs positives.

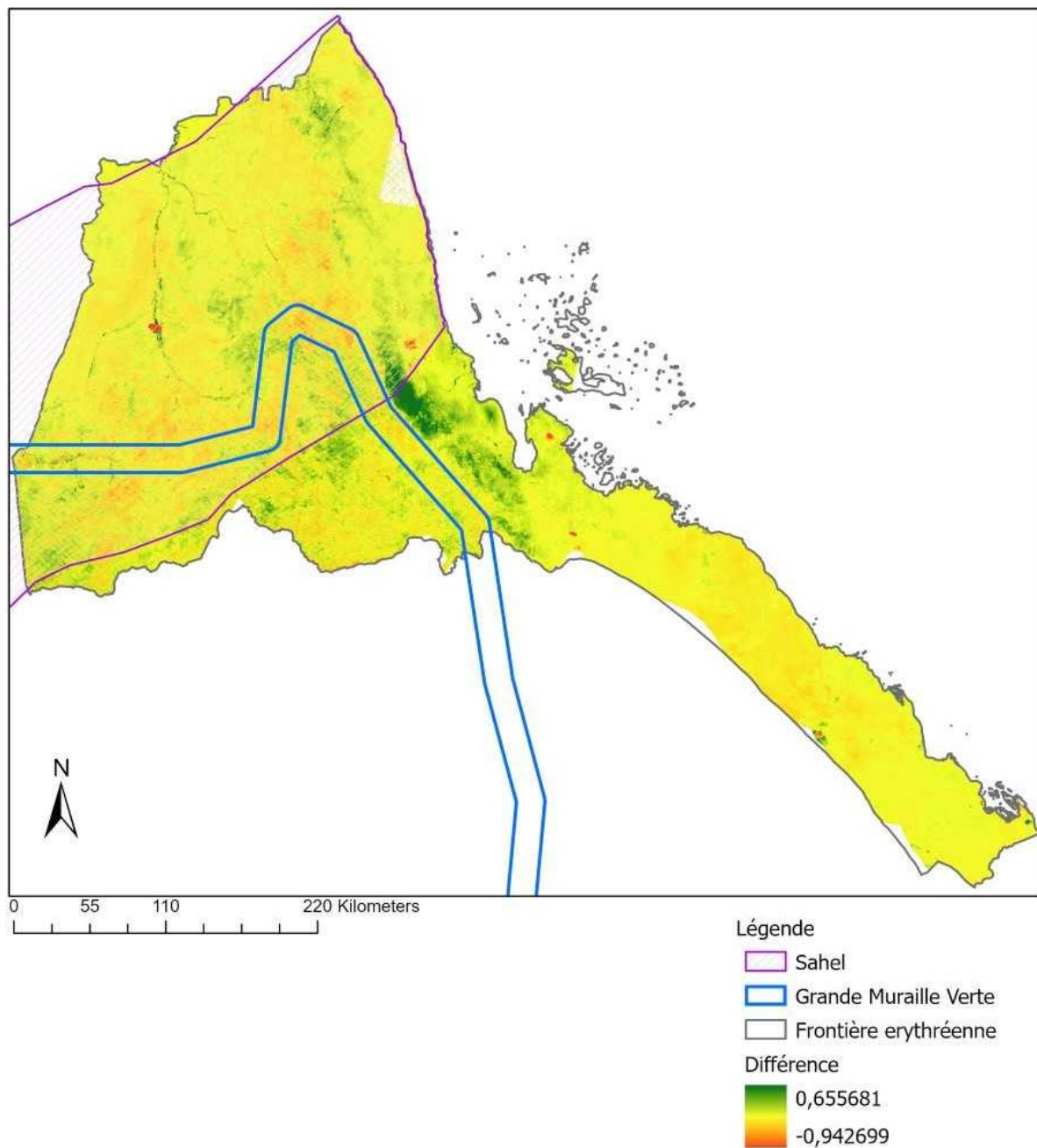
Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Soudan



Carte 10 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour le Soudan.

Pour ce pays aussi, un manque de données est à rapporter pour la région du Nord-Est ainsi que certaines régions du Sud du pays. L'ensemble du pays semble rester dans les couleurs jaunes à verts. Néanmoins quelques endroits sont rouges-oranges, notamment au niveau des barrages de Merowe (Centre-Nord) et d'Ad-Damazin (Sud-Est), mais aussi à l'Est du pays. La GMV borde certains de ces centres de valeurs négatives sans toutefois les traverser. C'est pourquoi, les valeurs de la GMV au Soudan sont positives.

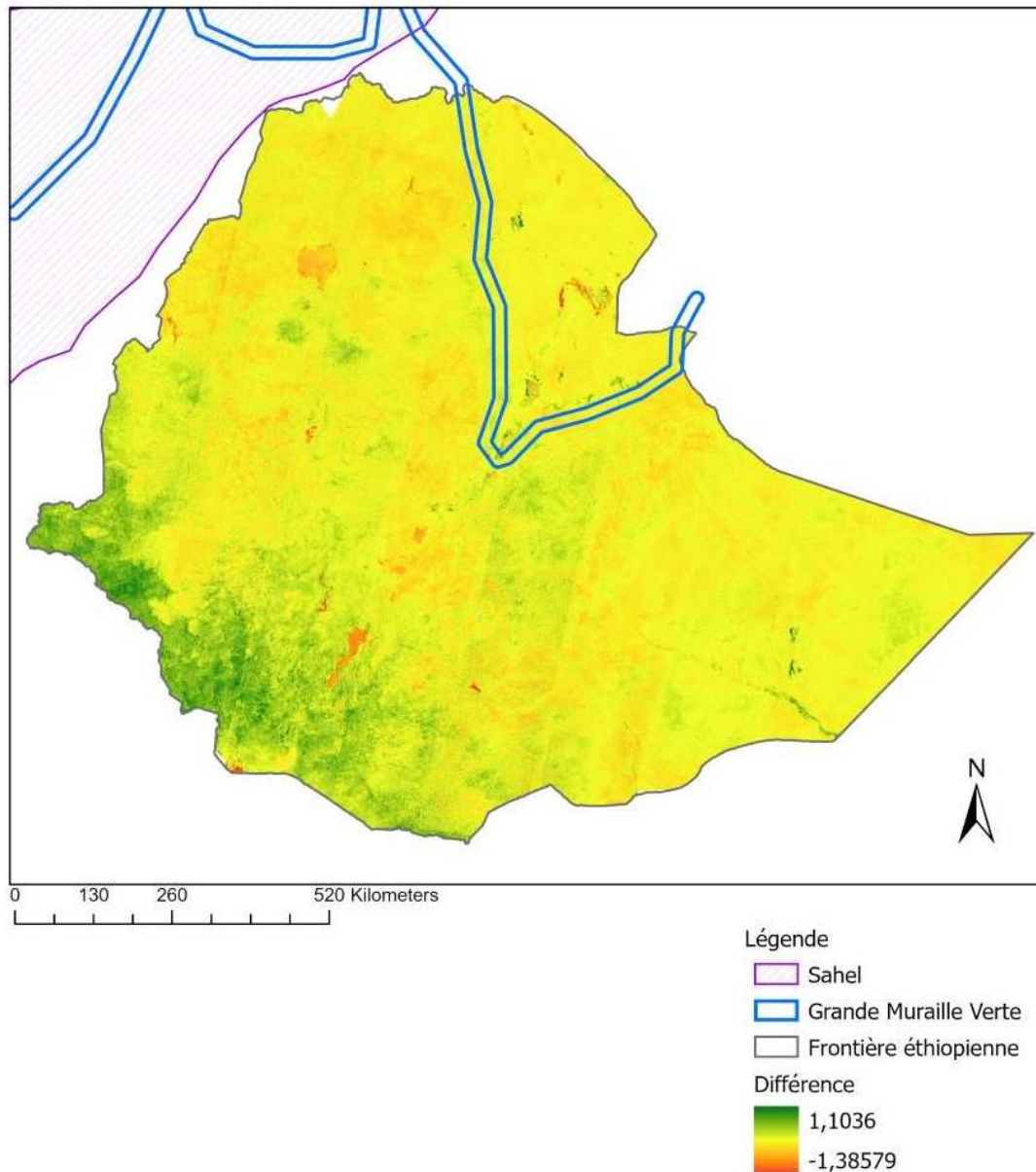
Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour l'Erythrée



Carte 11 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour l'Erythrée.

On voit qu'il y a une zone, au centre du pays, dont les valeurs sont nettement plus positives que dans les autres régions. Cette zone coïncide avec celle de la capitale de l'Erythrée, Asmara. Certaines petites zones sont particulièrement rouges, comme au niveau du barrage de Kerkebt (Est du pays) ou le lac de Firakhito (centre du pays). Le tracé de la GMV longe la zone verte d'Asmara mais n'y rentre pas. Par conséquent, les valeurs de la différence entre 2006-2020 pour la GMV ne sont pas très importantes, beaucoup de régions sont entre l'orange et le vert-clair.

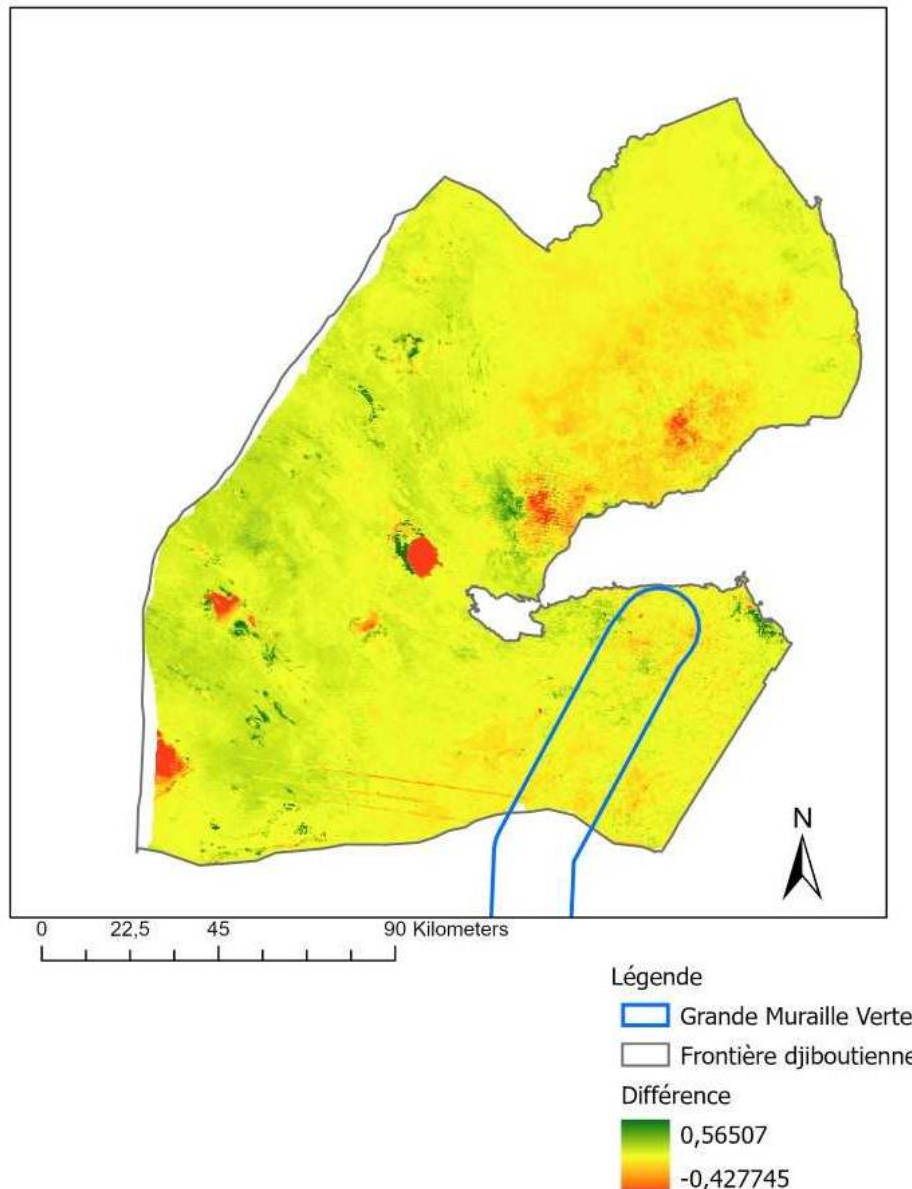
Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour l'Ethiopie



Carte 12 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour l'Ethiopie.

On remarque rapidement que la région Sud-Ouest est la région avec les valeurs de différences les plus élevée. Si l'on remonte vers le Nord-Est, nous obtenons une sorte de dégradé du vert à l'orange. Néanmoins on trouve aussi quelques zones vertes à l'Est du pays ainsi qu'au centre. Les régions avec les valeurs les plus négatives sont les lacs Abaya (Centre-Sud), Turkana (Sud-Ouest), Tana (Nord) et dans la région de la rivière Awash (Nord-Est). La GMV traverse les territoires du Nord et du Nord-Est du pays. Ce faisant, elle ne traverse pas les régions les plus vertes. La plupart des régions traversées par la GMV sont jaunes ou vert clairs.

Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour Djibouti



Carte 13 : Carte de la différence des valeurs moyennes annuelles du NDVI entre 2006 et 2020 pour Djibouti.

On remarque de gros points rouges qui correspondent aux régions du lac Assal, lac Abe ou encore de la région au Nord-Ouest de Yoboki (Sud-Ouest). Les régions les plus vertes sont réparties dans le pays. Certaines de ces régions sont les régions côtières proches de la localité de Djibouti, ou celles proches du Day Forest National Park (centre du pays). La GMV traverse des zones relativement jaunâtres, avec des régions plus vertes au centre de son tracé.

4. Discussion

4.1 GMV

On constate, d'après ces résultats, que la région de la GMV au Sahel est une région dynamique dans son indice NDVI.

Tout d'abord, les histogrammes par année pour la GMV indiquent une tendance à l'augmentation du nombre de pixels à grandes valeurs en 2020 par rapport 2007. Ces histogrammes donnent une bonne image globale de l'évolution de la situation et du type de végétation de la GMV. On peut remarquer l'évolution des valeurs NDVI plus facilement avec l'histogramme empilé. On voit que le maximum du nombre de pixels se trouve majoritairement dans deux classes : 0.125-0.188 et 0.188-0.250. Ces valeurs positives, mais faibles, correspondent à celles de prairie ou d'arbustes (17), mais plus généralement cela correspond à une absence de canopée. Ce type de végétation est typique de la région sahélienne. L'augmentation au fil des années du nombre de pixels dans les plus grandes valeurs peut indiquer un certain « verdissement » de cette région, et, par conséquent, une augmentation de la canopée et de la couverture forestière.

Toutefois, il faudrait vérifier ces résultats avec des données sur le terrain. En effet, il est important de savoir si la surface boisée à bel et bien progressé et ce, grâce au projet de la Grand Muraille Verte, ou si cela est dû à un verdissement spontané causé par des précipitations plus importantes par exemple. Enfin, il serait intéressant de savoir également si le verdissement est dû à une augmentation de l'activité agricole dans la région plutôt qu'à un développement forestier local. Cependant, d'après l'article de Martin Brandt, au Sénégal, il semblerait qu'il s'agit plutôt d'un développement de la couverture forestière (21).

En ce qui concerne les séries temporelles, on peut déjà observer une augmentation des valeurs NDVI moyennes à travers le temps depuis la mise en place du projet de la GMV en 2007 pour toute la région concernée. En effet, pour chaque pays, la droite de régression linéaire des valeurs moyennes du NDVI augmente, indiquant qu'il y a bien un verdissement de la région et ce, dans chaque pays (cf. **Annexe ; Séries temporelles**). Ceci soutient donc les résultats des histogrammes qui donnaient déjà un aperçu de ce verdissement. De plus, statistiquement, à part le Sénégal et la Mauritanie, tous les autres pays sont significatifs dans leurs résultats des séries temporelles (cf. **Tableau 6**). Ce qui est vraiment intéressant c'est que ce verdissement s'opère dans chaque pays traversé par la GMV, bien qu'à des taux différents. Par exemple, des pays comme le Sénégal ont une augmentation d'environ 0.02 (cf **Figure 9**) alors que le Cameroun a une augmentation d'environ 0.13 (cf **Annexe ; Figure 47**). Cependant il faut mettre en perspective ces résultats avec la région traversée par la GMV. Au Cameroun, la GMV traverse la pointe Nord du pays, ce qui est une bien plus petite région que la région de la GMV du Sénégal qui traverse tout le pays dans sa partie Nord. Ainsi, il est bien plus facile d'augmenter l'indice NDVI sur une petite région que sur une région bien plus étendue.

Ces résultats sont d'autant plus encourageants lorsqu'on les compare à ceux de la période 1999-2006 (cf. **Annexe ; Séries temporelles**). En effet, pour tous les pays, sauf Djibouti, cette période se traduit par une baisse des valeurs NDVI moyennes. Ainsi, avec la mise en place du

projet de la Grande Muraille Verte, les autorités de ces différents pays ont, semble-t-il, réussi à inverser la tendance de l'aridification de cette région. Néanmoins, il faut manier ces résultats avec prudence car les périodes comparées ne sont pas identiques et les résultats pour la période 1999-2006 ne sont pas significatifs, exception faite du Cameroun, du Soudan et de Djibouti. La période 1999-2006 ne fait que huit ans car il n'y avait pas de données disponibles pour une grande partie de l'Afrique avant cette période. D'ailleurs, pour certaines régions d'Afrique, il y a toujours un manque de données satellitaires dans les années qui suivent (cf. **Résultats, Carte des différences de NDVI**). Ainsi, les comparaisons n'ont pas pu inclure des périodes de même longueur ; néanmoins, cette première comparaison permet de tirer les tendances de l'évolution des valeurs moyennes de NDVI pour ces années-là et permet de se faire une bonne idée de l'impact qu'à le projet de la GMV. La fait que la période 1999-2006 soit plus courte que la période 2007-2020 peut également jouer un rôle dans le faible taux de significativité des résultats pour les différents pays.

Donc, on peut constater que pour tous les pays, sauf Djibouti qui a toujours eu une tendance positive, il y a un inversement des tendances pour les valeurs moyennes de NDVI, passant d'une diminution au fil du temps à une augmentation.

Il faut également considérer ces résultats avec les tableaux des différences des valeurs NDVI moyennes entre l'année 2006 et 2020 (cf. **Tableau 3**). En effet, pour la GMV on voit que tous les pays, sauf le Mali, présentent un NDVI moyen en 2020 supérieur à celui de 2006. Ceci corrobore, à l'exception du Mali, les résultats obtenus avec les séries temporelles et les histogrammes. Cependant, lorsqu'on observe la série temporelle du Mali, on constate que sa courbe de croissance augmente bel et bien. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'il peut y avoir des fluctuations annuelles. Le fait que le Mali a sa partie de la GMV avec une valeur plus faible en 2020 qu'en 2006 peut être dû à une mauvaise année météorologique par exemple, bien que cette hypothèse soit peu probable compte tenu des valeurs importantes de la Mauritanie qui se trouve à proximité. On peut aussi remarquer que, de manière globale, les pays de l'Ouest de la GMV (Sénégal, Mauritanie, Mali, Burkina Faso, Niger) ont des différences 2006-2020 plus faibles que la moyenne alors que les pays de l'Est de la GMV (Ethiopie, Soudan, Tchad, ...) ont des différences plus grandes. Seul Djibouti a des valeurs proches de celles des pays de l'Ouest. Il serait intéressant de voir si cette tendance de l'Est à avoir des valeurs de différences plus importantes que l'Ouest perdure dans le temps et à quoi cela est dû. On peut imaginer, par exemple, que cette différence Est-Ouest peut être due à une météo plus clémente à l'Est qu'à l'Ouest pour cette année, ou que les pays de l'Est investissent plus dans le reverdissement de la GMV que les pays de l'Ouest, mais il faudrait analyser les finances du projet de la GMV pour répondre à cela. Il y a aussi tous les facteurs sociaux, politiques et géopolitiques qu'il faudrait prendre en compte. Ceci pourrait faire l'objet de futures recherches afin de déterminer quels sont les facteurs qui interagissent avec le projet de la GMV et de quelle(s) manière(s).

4.2 Sahel

Le constat fait pour les séries temporelles de la GMV peut aussi s'appliquer pour la région du Sahel dans son ensemble. En effet, pour la période 1999-2006, tous les pays à l'exception du

Sénégal, de la Mauritanie, du Mali et du Niger avaient une tendance à la baisse de leurs valeurs moyennes annuelles NDVI. Le Sénégal et le Mali présentaient une stagnation de leur tendance alors que le Niger et la Mauritanie avait déjà une augmentation de ces valeurs NDVI. En revanche, pour la période allant de 2007 à 2020, tous les pays sans exception, voient leur droite de régression linéaire augmenter. Là aussi, tous les pays ne sont pas égaux : Dans le cas du Sénégal (cf **Figure 11**), on passe d'une valeur de la droite de régression linéaire d'environ 0.25 en janvier 2007 à 0.27 en décembre 2020, soit une augmentation de +0.02, alors que dans du Nigeria (cf **Annexe, Figure 45**) on passe d'une valeur d'environ 0.21 au début 2007 à une valeur d'environ 0.26 fin 2020, soit une augmentation de +0.05, le double de la valeur du Sénégal sur la même période. Ainsi, tous les pays ne reverdissent pas leur région du Sahel avec la même ampleur. Toutefois il est clair que cette région, dans sa globalité, tend à ne plus se désertifier ou du moins, à moins se désertifier. Ceci tend à corroborer les différentes recherches qui mettaient en lumière une tendance au Sahel à se reverdir(3,8). Toutefois, il faut nuancer ces propos aux vues des résultats des F-tests. En effet, pour la période 2007-2020, tous les pays ont une p-value inférieure à 0.05. Ainsi tous les pays ont leurs résultats des séries temporelles qui sont significatifs. Donc il y a bien une tendance à l'augmentation des valeurs NDVI moyennes. En revanche, pour la période 1999-2006, seuls la Mauritanie, le Niger, le Nigeria, le Tchad et le Soudan sont significatifs ce qui veut dire que les tendances pour les autres pays ne le sont pas. On ne peut donc pas conclure qu'il y a bel et bien un changement de tendance dans ces pays. Néanmoins, les résultats des séries temporelles, même s'ils ne sont pas significatifs, permettent de se faire une première idée de la situation.

Au contraire de la GMV, pour le Sahel, les différences de valeurs NDVI moyennes pour 2006 et 2020 sont toutes positives. Ceci veut dire qu'en comparaison de l'année 2006, en 2020, le Sahel était plus vert. Cependant, comme mis en avant avec les séries temporelles, tous les pays ne sont pas logés à la même enseigne. On voit bien une tendance marquée entre l'Ouest et l'Est du Sahel (cf. **Tableau 2**). Cette tendance soutient celle vue avec la GMV. En effet, le Nigeria, le Cameroun, le Tchad, le Soudan et l'Erythrée voient tous leurs valeurs de différence bien en-dessus de la moyenne. C'est le contraire pour les pays de l'Ouest du Sahel (Sénégal, Mauritanie, Mali, Burkina Faso et Niger). On remarque également que le Mali est le pays avec la différence la plus faible, tout comme avec la GMV. Néanmoins la différence négative observée sur la GMV est diluée dans le territoire du Sahel et ce dernier, dans son ensemble, à une différence positive. Ici aussi, cette différence Est-Ouest peut avoir plusieurs explications comme la météo, le financement ou la situation géopolitique des différents pays. Toutefois, il faut aussi prêter attention au fait que tous les pays n'ont pas le même score NDVI moyen en 2006. Ainsi, le Sénégal, qui a une différence entre 2006 et 2020 relativement faible, présente l'un des scores NDVI les plus élevés parmi tous ces des pays : 0.2379 en 2006, bien au-delà de la valeur moyenne de 0.1780. C'est pourquoi, ayant déjà un score élevé de base, il peut être plus compliqué à augmenter car le Sahel ne peut pas avoir un score NDVI trop élevé au vu des conditions météorologiques et climatiques de la région.

Finalement, on peut en conclure que le verdissement de la GMV a un impact sur le Sahel et qu'il permet un certain verdissement de ce dernier. Néanmoins il ne faut pas penser qu'il n'y a que la région de la GMV qui se reverdit ou que c'est la seule région à jouer un rôle dans le verdissement du Sahel. En effet, pour certains pays, le Sahel a un score plus élevé en 2020 que

la région de la GMV, malgré le fait que cette dernière bénéficie d'investissements. C'est notamment le cas pour le Sénégal, le Mali, le Burkina Faso, le Cameroun et le Soudan. Ceci montre bien que la région de la GMV peut encore se développer et se reverdir, et que d'autres régions du Sahel sont plus vertes que la GMV malgré l'intérêt porté à cette dernière.

4.3 Pays

Si l'on regarde maintenant à l'échelle des pays, la différence Est-Ouest constatée à l'échelle de la GMV et du Sahel, est plus mitigée. En effet, certains pays de l'Ouest de l'Afrique s'en sortent bien, voire mieux, que des pays de l'Est (cf. **Tableau 1**). Le Sénégal ou le Burkina Faso, par exemple, ont tous les deux un score de différence 2006-2020 plus important que le Tchad ou le Soudan (scores de différence entre valeurs NDVI 2006-2020 de 0.0370, 0.0423, 0.0043 et 0.0347 respectivement). Néanmoins cette observation peut s'expliquer par le fait que le Tchad ou le Soudan ont de vastes territoires au Nord dans le désert du Sahara. Ceci n'est pas le cas du Sénégal ou du Burkina Faso qui ont, eux, une partie de leur territoire dans le biome de la savane soudanienne occidentale, beaucoup moins aride et par conséquent plus vert. Ainsi, les pays possédant des régions très arides, comme celles dans le désert, se voient pénalisés car ces régions ne peuvent pas se reverdir ou très peu. Et avec le changement climatique ces régions arides tendent à s'étendre. On voit que ce sont ces pays, à savoir la Mauritanie, le Mali, le Niger, le Tchad et le Soudan qui ont les valeurs de différences 2006-2020 les plus faibles et en-dessous de la moyenne (avec un score de 0.0204, -0.0108, 0.0073, 0.0043 et 0.0347 respectivement). D'ailleurs, encore une fois, le Mali est le pays avec le moins bon score, puisqu'il est le seul avec une valeur négative (-0.0108). Ainsi, à l'échelle du pays, le changement positif de valeur NDVI dans le Sahel n'a que peu d'impact car il est noyé dans le reste des valeurs du pays.

Finalement, le bilan est quelque peu mitigé. En effet, certains pays ont un plus grand territoire à gérer, et donc à reverdir, ce qui est plus compliqué que pour les pays plus petits. D'autres pays avaient déjà de bonnes valeurs moyennes de NDVI dans le passé et il leur est difficile de l'augmenter encore plus. Enfin, les pays qui ont les meilleurs scores de différence pour le NDVI pour la GMV ne sont pas forcément les pays qui ont le meilleur score à l'échelle de tout leur territoire. En effet, des pays comme le Soudan, avec un bon score pour la région de la GMV (0.0572), peuvent avoir un score moins bon à l'échelle du pays (0.0347) car une partie du territoire du pays se trouve dans des régions désertiques ou très arides ce qui rend la revégétalisation de ces régions très compliquée. Ces régions désertiques pénalisent donc les pays qui en sont pourvus. Néanmoins, une des constantes que l'on peut mettre en évidence, c'est que le Mali est le pays avec la différence 2006-2020 la plus faible et ce pour les trois échelles analysées (GMV, Sahel et pays). De plus, il est l'un des pays avec le plus faible score NDVI moyen sur tout son territoire, malgré le fait qu'il possède des territoires dans des régions moins arides que le désert. Ce résultat peut être également dû à des causes externes, comme une météo particulièrement mauvaise. En effet, l'année 2020 a été l'une des trois années les plus chaudes jamais enregistrée (22), ce qui a pu jouer un rôle dans les précipitations du pays. Autre constante, le projet de la GMV semble porter ses fruits puisque, dans la région de la GMV, la tendance des valeurs moyennes du NDVI augmente, et ce, pour tous les pays, même

le Mali. Ce constat indique que l'année 2020, pour le Mali, semble être une année particulièrement mauvaise puisque normalement ses valeurs de NDVI moyennes augmentent à la fois pour le Sahel et pour la GMV.

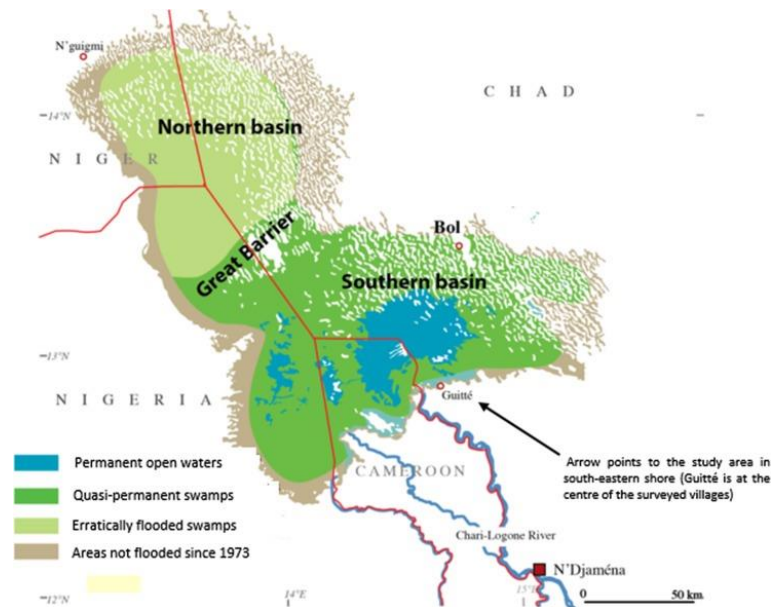
Lorsque l'on regarde les cartes de différences 2006-2020, on constate que les régions qui ont le plus grand changement de valeurs moyennes de NDVI ne sont pas forcément sur le trajet de la GMV ou dans la région du Sahel. D'autres régions, en dehors GMV, voient leurs indices NDVI augmenter durant la même période. Ce diagnostic plus fin peut être fait grâce aux différences de valeurs moyennes de NDVI entre l'année 2006, année avant la création de l'Initiative de la Grande Muraille Verte, et 2020 (cf. **Carte 2-13**).

Grâce à ces cartes on peut voir, pour chaque pays, où se trouvent les zones qui s'améliorent et, au contraire, les zones qui perdent leurs valeurs NDVI et s'assèchent. Pour chaque pays cela est différent. Dans la majeure partie des cas, la carte ressemble à un patchwork entre zones à tendance verte (différence de NDVI moyen 2006-2020 positive) et zones à tendance orange-rouge (différence de NDVI moyen 2006-2020 négative). Il y a seulement quelques pays où l'on peut constater un certain dégradé de couleur à travers leurs territoires. Par exemple, le Mali (**Carte 4**) où sa partie Sud obtient les moins bons scores de différence tandis que sa partie Nord obtient les meilleurs. De plus, la GMV traverse la zone qui peut faire office de frontière entre la partie Sud et Nord. Pour un pays tel que le Mali, où la partie Sud correspond à sa partie la moins aride, par conséquent sa partie la plus végétalisée, il est inquiétant de constater que c'est cette région qui se dégrade le plus. En revanche il est étonnant de constater que c'est sa partie la plus désertique qui s'en sort le mieux et qui a tendance à se reverdir. C'est d'ailleurs le seul pays avec une région désertique qui présente cette tendance. Il y a peut-être eu un problème avec la prise de données ou pendant la manipulation des données, même si cela peut paraître étonnant car le même code JavaScript a été utilisé pour tous les pays et seul le Mali présente ces tendances.

Il y a également l'Ethiopie, le Soudan et le Nigeria où l'on voit un dégradé à travers le territoire. Pour l'Ethiopie (**Carte 12**) c'est dans un axe Sud-Ouest (vert) à Nord-Est (orange). Ceci n'est pas vraiment étonnant puisque la partie Sud-Ouest correspond à la partie du pays avec un climat tropical, donc humide. La partie Nord-Est est bien plus aride avec un climat désertique (c'est dans cette région que l'on trouve le désert de Danakil).

Pour le Soudan (**Carte 10**) c'est un axe Sud (vert)-Nord (orange). Là encore, rien d'exceptionnel puisque le Nord du Soudan se trouve en pleine région désertique ce qui n'est pas le cas du Sud du pays. Enfin, pour le Nigeria (**Carte 7**), on trouve un axe Nord (vert)-Sud (orange), ce qui est intrigant lorsqu'on sait que le Sud du Nigeria possède un climat équatorial, plus humide, alors que le Nord est recouvert par le Sahel. On devrait donc s'attendre à avoir de meilleurs scores au Sud qu'au Nord. Cependant, le Nigeria connaît une déforestation importante, notamment à cause de l'agriculture ou pour obtenir du bois de chauffage (23). Il est l'un des pays avec le plus fort taux de déforestation (24). Ainsi, la partie Sud, plus humide et plus forestière que la partie Nord, est plus sujette à la déforestation ce qui peut expliquer la grande différence de score NDVI moyen entre l'année 2006 et 2020 pour cette région.

On peut aussi remarquer grâce à ces cartes, que certaines régions transfrontalières subissent d'importants changements. Par exemple, en examinant les cartes du Tchad et du Niger, on remarque que la région du lac Tchad, à cheval sur ces deux pays, subit une importante perte de valeur NDVI entre 2006 et 2020. En effet, le lac Tchad a vu sa surface diminuer de manière importante ces dernières décennies jusqu'à se restreindre à sa partie Sud(6,25,26) (cf **Carte 14**).



Carte 14 : représentation du Lac Tchad, tiré de l'article (25).

Ainsi, la région Nord du lac, aux frontières du Niger et du Tchad, s'assèche et par conséquent toute la végétation et l'agriculture local en pâtit (26). Ce constat n'est pas partagé sur le territoire du Cameroun ou du Nigéria car la partie Sud du lac Tchad se trouve sur la frontière entre ces deux pays. Ce faisant, la végétation y est encore bien présente puisque le lac n'a pas diminué dans cette région.

Enfin, dernière observation particulière, en Erythrée on voit que la région juste à l'Est du tracé de la GMV s'est particulièrement reverdie entre 2006 et 2020. Cette région coïncide avec celle de la capitale du pays. Il est déjà étonnant de voir un centre urbain se reverdir aussi fortement. Cependant, lorsqu'on regarde la forme de la zone en vert on voit qu'elle suit le tracé de la GMV mais est décalée à l'Est. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le tracé de la GMV, hormis au Sénégal, s'est faite à la main sur la base de la carte de l'article de Mbow (1). Ainsi, il se pourrait que le véritable tracé de la GMV passe bien par la capitale, Asmara, et sa zone verte. Ceci pourrait expliquer pourquoi la région autour de la capitale a vu son score NDVI augmenter autant alors que la région dans le tracé de la GMV n'a pas beaucoup évolué entre les deux années considérées.

On remarque également que la GMV traverse autant des régions avec un bon score de différence que des régions avec un mauvais score. Chaque pays gère différemment sa partie de la GMV et on voit que pour la majorité des pays il n'y a pas de pattern bien défini de reverdissement. Ainsi, il est difficile de mettre en lumière une amélioration de l'état des régions de la GMV dans son ensemble. Cependant ces dernières permettent de voir quelles régions dans chaque pays voit sa végétation croître ou se résorber.

On peut aussi observer sur certaines cartes qu'il y a des régions blanches, sans valeur. Ces régions n'ont pas de donnée et par conséquent, aucun traitement de donnée et donc aucun résultat n'a pu être obtenu. Il serait intéressant d'effectuer des recherches plus approfondies sur ces régions, notamment en utilisant soit une autre source de données que les satellites Landsat (comme par exemple utiliser les données MODIS prises par les satellites Terra ou Aqua) soit faire une fusion de données Landsat avec des données d'autres satellites pour compléter les données manquantes.

Enfin, une remarque générale pour l'ensemble des échelles spatiales étudiées (GMV, Sahel et Pays), certains problèmes avec les données peuvent jouer un rôle sur la qualité et la précision des résultats. En effet, on peut remarquer avec la carte du Sénégal (**Carte 2**) qu'il y a des délimitations parallèles très marquées entre les différentes prises de données du satellite. Par exemple entre la région verte centrale et la région orangée de l'Ouest du pays. Ces délimitations, qui n'existent pas dans la réalité, sont dû à une mauvaise qualité des données, notamment de Landsat7. Ceci peut être dû au problème de défaillance du Scan Line Corrector apparu en 2003.

Le manque de donnée dans certaines régions peut également jouer un rôle dans la précision des résultats finaux. En effet, des données manquantes pour nos régions d'intérêts rendent les résultats pas aussi précis qu'escompté initialement puisque ces régions ne sont pas prises en compte lors du traitement des données et pour les résultats.

De plus, le manque d'accès aux données officielles du tracé de la GMV ainsi que de la délimitation du Sahel peuvent aussi jouer un rôle dans les résultats finaux. On peut imaginer, par exemple, que certaines régions faisant parti du tracé officiel ne sont pas prises en compte dans le tracé créé dans cette étude et par conséquent dans les résultats des séries temporelles ou des histogrammes. On peut imaginer ce problème avec le cas de l'Erythrée (**Carte 11**) comme expliqué plus haut dans la discussion.

5. Conclusion

En conclusion, les différentes méthodes de télédétection utilisées (Histogrammes, Séries temporelles et cartes de différence de valeurs moyennes de NDVI entre 2006-2020) ainsi que les résultats présentés dans ce travail montrent bien une tendance à un reverdissement généralisé dans la région de la GMV ainsi que dans la région du Sahel depuis la création en 2007 de l'Initiative de la Grande Muraille Verte. En effet, l'ensemble des pays analysés dans ce travail qui sont traversés par le Sahel ont des tendances significatives pour la période 2007-2020. Pour la GMV, ce constat est également fait, sauf pour le Sénégal et la Mauritanie où les tendances sont aussi à l'augmentation des valeurs NDVI mais elles ne sont pas significatives. Ces résultats répondent donc à notre objectif de travail qui était de détecter, ou non, un verdissement de la région de la GMV et du Sahel. En revanche, aucune conclusion générale ne peut être faite pour la période 1999-2006, car trop peu de pays ont une tendance significative.

Cependant ces résultats sont à nuancer car on peut constater des variations géographiques et temporelles : si on observe bien avec les histogrammes et les séries temporelles une augmentation du score NDVI sur l'ensemble de la région, les tableaux des différences 2006-2020 montrent qu'il y a des « mauvaises » années où les scores NDVI sont moins bons. L'exemple du Mali illustre bien ce fait, où 2020 fut une moins bonne année que l'année 2006 pour la région de la GMV. De plus, les cartes des différences de NDVI présentent clairement des zones au sein de la GMV et du Sahel qui s'améliorent alors que d'autres se détériorent. Ceci démontre la nécessité d'agir localement afin d'atténuer les dégradations régionales. Ce travail montre également qu'il est nécessaire d'augmenter l'accès aux données et/ou à la création de nouvelles données spatiales, comme les données shapefiles de la trajectoire de la GMV. De plus, il serait intéressant de continuer à faire le suivi de la GMV pour voir si la tendance au reverdissement se poursuit malgré le changement climatique. Enfin, d'autres études sont nécessaires pour appréhender l'entièreté des paramètres influençant le développement de la GMV, afin de comprendre pourquoi certaines régions se reverdisent plus que d'autres. De plus, un travail de terrain serait bénéfique afin de confronter ses résultats avec la réalité du terrain et afin de juger si l'augmentation des valeurs NDVI sont dû à un changement de végétation ou à une végétation plus importante par exemple. Enfin, certains paramètres satellitaires, comme la défaillance en 2003 du Scan Line Corrector, jouent un rôle important et peuvent, par conséquent, rendre les données moins fiables. De telles données pèsent lourd sur les résultats. Par conséquent il faudrait éviter au maximum d'utiliser ce genre de données. Les résultats de ce travail de mémoire vont dans le sens des observations faites dans d'autres travaux de recherche sur le reverdissement du Sahel. Mais c'est le premier travail de ce genre, d'après les recherches menées, qui prouve un reverdissement global sur l'ensemble de la partie sud de l'IGMVSS.

6. Bibliographie

1. Mbow C. The Great Green Wall in the Sahel [Internet]. Oxford Research Encyclopedia of Climate Science. 2017 [cité 14 déc 2021]. Disponible sur: <https://oxfordre.com/climatescience/view/10.1093/acrefore/9780190228620.001.0001/acrefore-9780190228620-e-559>
2. Climat Genève: Température de l'eau à, Température moyenne Genève, Pluviométrie, diagramme ombrothermique pour Genève - Climate-Data.org [Internet]. [cité 14 déc 2021]. Disponible sur: <https://fr.climate-data.org/europe/suisse/geneve/geneve-839/>
3. Kaptué AT, Prihodko L, Hanan NP. On greening and degradation in Sahelian watersheds. *Proc Natl Acad Sci.* 29 sept 2015;112(39):12133-8.
4. OPS Press kit FR Version_1.pdf [Internet]. [cité 14 déc 2021]. Disponible sur: https://www.unccd.int/sites/default/files/inline-files/OPS%20Press%20kit%20FR%20Version_1.pdf
5. Ouedraogo I, Mbow C, Bessike Balinga MP, Neufeldt H. Transitions in Land Use Architecture under Multiple Human Driving Forces in a Semi-Arid Zone. *Land.* 9 juill 2015;4:560-77.
6. <https://plus.google.com/+UNESCO>. Projet BIOSphère et PATrimoines du Lac Tchad (BIOPALT) [Internet]. UNESCO. 2018 [cité 14 déc 2021]. Disponible sur: <https://fr.unesco.org/biopalt>
7. Collinson M. *The African Food Crisis*. Edited by G. Djurfeldt, H. Holmen, M. Jirstrom and R. Larsen. Wallingford, UK: CABI Publishing (2005), pp. 266, £55.00. ISBN 0-85199-998-0. *Exp Agric.* 2006;42:125-6.
8. C. Dardel, L. Kergoat, P. Hiernaux, E. Mougin, M. Grippa, C.J. Tucker. Re-greening Sahel: 30years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger). *Remote Sens Environ.* janv 2014;140:350-64.
9. Dardel C, Kergoat L, Hiernaux P, Grippa M, Mougin É, Ciais P, et al. Rain-Use-Efficiency: What it Tells us about the Conflicting Sahel Greening and Sahelian Paradox. *Remote Sens.* avr 2014;6(4):3446-74.
10. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. La Grande Muraille Verte | Action contre la désertification | Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture [Internet]. [cité 14 déc 2021]. Disponible sur: <https://www.fao.org/in-action/action-against-desertification/action-against-desertificationbackground/action-against-desertificationbackgroundvision/fr/>
11. Agence Panafricaine de la Grande Muraille Verte [Internet]. [cité 14 déc 2021]. Disponible sur: <http://www.grandemurailleverte.org/>

12. Google Earth Engine [Internet]. [cité 14 déc 2021]. Disponible sur: <https://earthengine.google.com>
13. Landsat Surface Reflectance | U.S. Geological Survey [Internet]. [cité 14 déc 2021]. Disponible sur: https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-surface-reflectance?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con
14. Landsat 4-7 Surface Reflectance Quality Assessment | U.S. Geological Survey [Internet]. [cité 14 déc 2021]. Disponible sur: https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-4-7-surface-reflectance-quality-assessment?qt-science_support_page_related_con=1#qt-science_support_page_related_con
15. Foga S, Scaramuzza PL, Guo S, Zhu Z, Dilley RD, Beckmann T, et al. Cloud detection algorithm comparison and validation for operational Landsat data products. *Remote Sens Environ.* juin 2017;194:379-90.
16. Large Scale International Boundaries [Internet]. geonode.state.gov. [cité 14 déc 2021]. Disponible sur: <https://geonode.state.gov/layers/catalog/geonode:LSIB>
17. NDVI: Normalized Difference Vegetation Index For Agriculture [Internet]. 2021 [cité 14 déc 2021]. Disponible sur: <https://eos.com/make-an-analysis/ndvi/>
18. Landsat Collection 1 Level-1 Quality Assessment Band | U.S. Geological Survey [Internet]. [cité 14 déc 2021]. Disponible sur: https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-1-level-1-quality-assessment-band?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con
19. Landsat 7 | Landsat Science [Internet]. 2021 [cité 14 déc 2021]. Disponible sur: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-7/>
20. GADM [Internet]. [cité 14 déc 2021]. Disponible sur: <https://gadm.org/data.html>
21. Brandt M, Mbow C, Diouf AA, Verger A, Samimi C, Fensholt R. Ground- and satellite-based evidence of the biophysical mechanisms behind the greening Sahel. *Glob Change Biol.* avr 2015;21(4):1610-20.
22. 2020 est l'une des trois années les plus chaudes jamais enregistrées [Internet]. 2021 [cité 14 déc 2021]. Disponible sur: <https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/2020-est-l%E2%80%99une-des-trois-ann%C3%A9es-les-plus-chaudes-jamais-enregistr%C3%A9es>
23. Agric_NV2020_LC2020_EX-ACT_Carbon_balance_May_4-rev-lb.pdf [Internet]. [cité 14 déc 2021]. Disponible sur: https://www.fao.org/fileadmin/templates/ex_act/pdf/case_studies/Agric_NV2020_LC2020_EX-ACT_Carbon_balance_May_4-rev-lb.pdf
24. Latest FREL submission shows Nigeria's progress on monitoring forest resources | REDD+ Reducing Emissions from Deforestation and Forest

Degradation | Food and Agriculture Organization of the United Nations [Internet]. [cité 14 déc 2021]. Disponible sur: <https://www.fao.org/redd/news/detail/en/c/1183510/>

25. Okpara UT, Stringer LC, Dougill AJ. Lake drying and livelihood dynamics in Lake Chad: Unravelling the mechanisms, contexts and responses. *Ambio*. nov 2016;45(7):781-95.
26. FAO - Nouvelles: Bassin du Lac Tchad: une crise profondément ancrée dans le contexte de la faim, de la pauvreté et de l'absence de développement rural [Internet]. [cité 14 déc 2021]. Disponible sur: <https://www.fao.org/news/story/fr/item/880782/icode/>

7. Annexes

7.1 Bandes spectrales

7.1.1 Landsat7

Senseur	Numéro de bande	Nom de la bande	Longueur d'onde (μm)	Résolution (m)
ETM+	1	Bleu	0.45-0.52	30
ETM+	2	Vert	0.52-0.60	30
ETM+	3	Rouge	0.63-0.69	30
ETM+	4	Proche-Infrarouge (NIR)	0.77-0.90	30
ETM+	5	Imagerie infrarouge à ondes courtes (SWIR1)	1.55-1.75	30
ETM+	6	Thermique	10.40-12.50	60*(30)
ETM+	7	Imagerie infrarouge à ondes courtes (SWIR2)	2.09-2.35	30
ETM+	8	Panchromatique	0.52-0.90	15

Tableau 4 : Tableau décrivant les bandes spectrales de Landsat7, d'après l'earth observing system (<https://eos.com/find-satellite/landsat-7/>)

7.1.2 Landsat8

Senseur	Numéro de bande	Nom de la bande	Longueur d'onde (μm)	Résolution (m)
OLI	1	Côtier/aérosol	0.43 – 0.45	30
OLI	2	Bleu	0.45 – 0.51	30
OLI	3	Vert	0.53 – 0.59	30
OLI	4	Rouge	0.63 – 0.67	30
OLI	5	Proche-Infrarouge (NIR)	0.85 – 0.88	30
OLI	6	Imagerie infrarouge à ondes courtes (SWIR1)	1.57 – 1.65	30
OLI	7	Imagerie infrarouge à ondes courtes (SWIR2)	2.11 – 2.29	30
OLI	8	Panchromatique	0.50 – 0.68	15
OLI	9	Cirrus	1.36 – 1.38	30

Tableau 5 : Tableau décrivant les bandes spectrales de Landsat8, d'après l'earth observing system (<https://eos.com/find-satellite/landsat-8/>)

7.2 Histogrammes

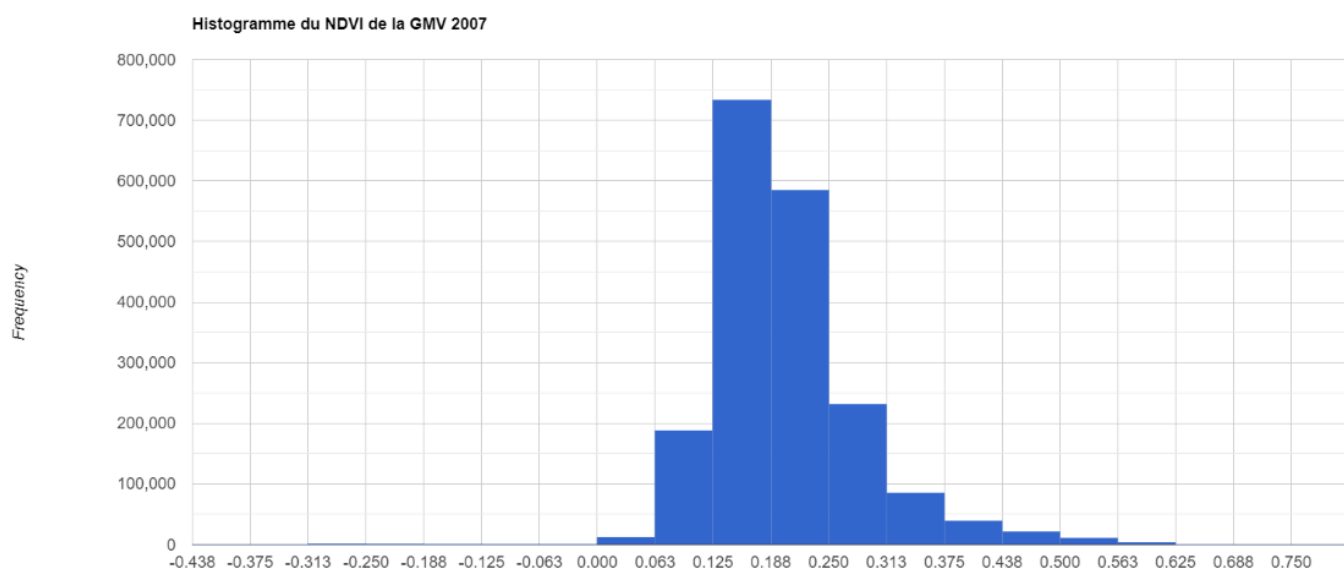


Figure 12 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2007. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.

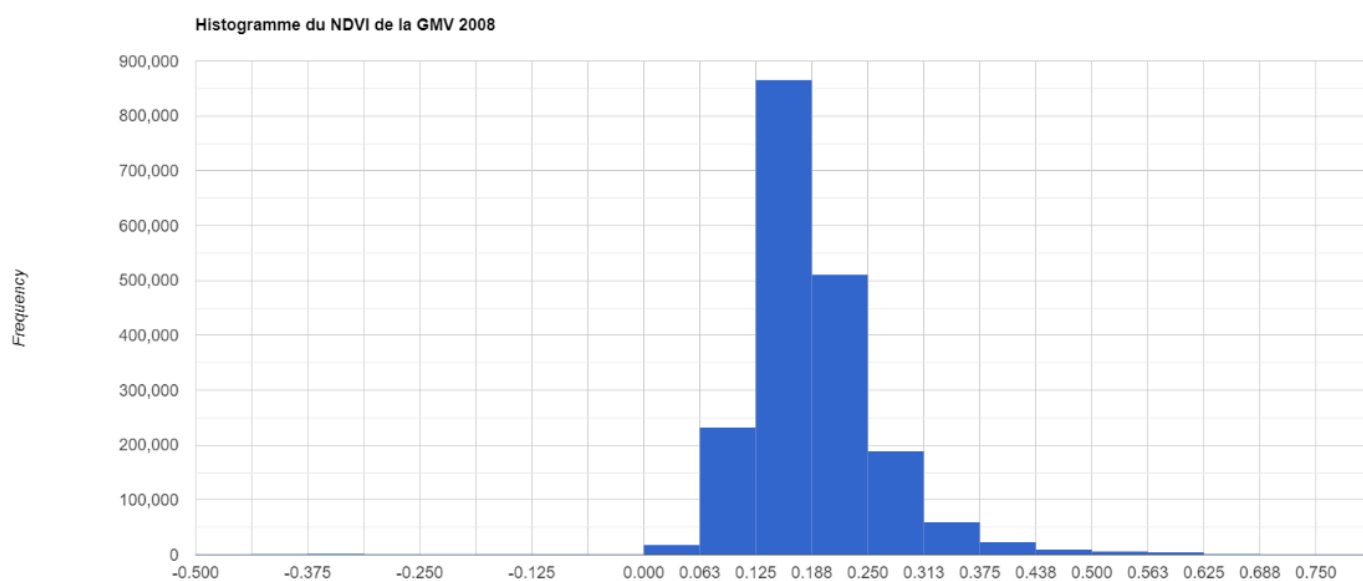


Figure 13 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2008. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.

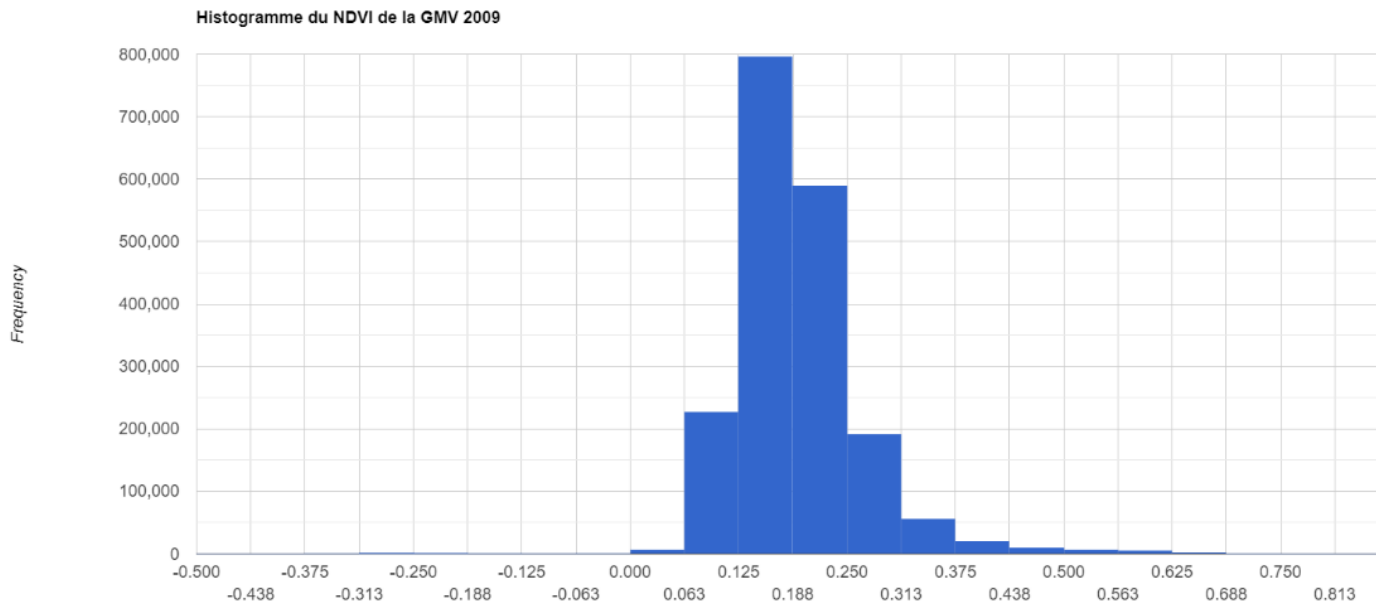


Figure 14 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2009. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.

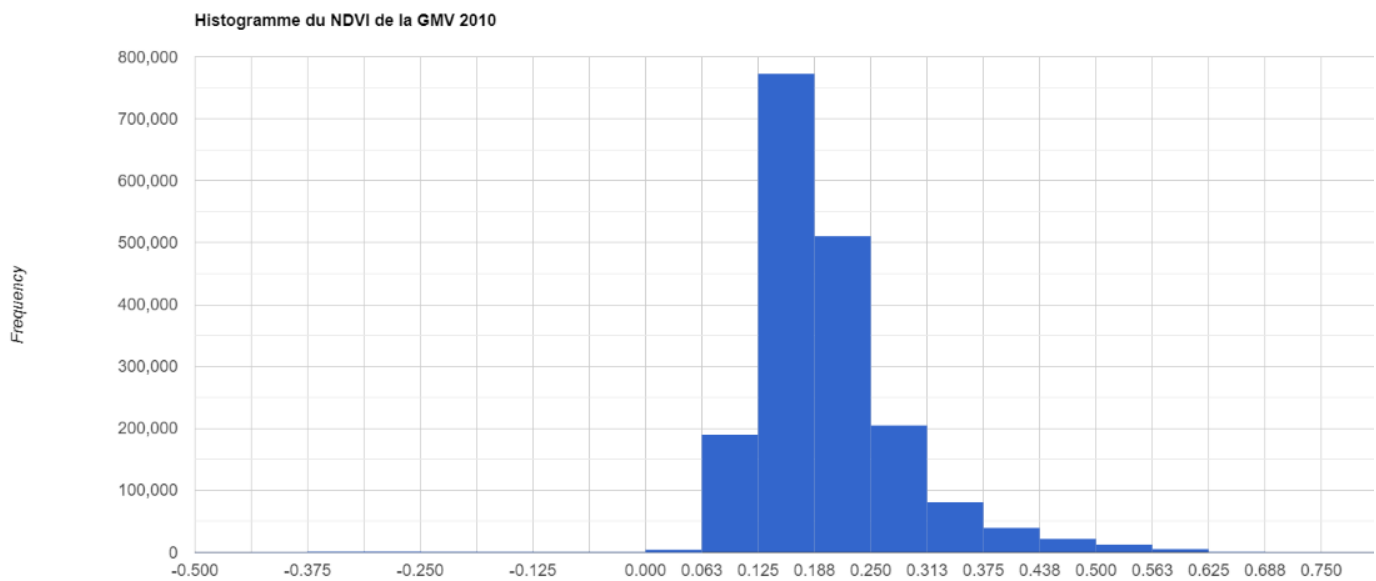


Figure 15 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2010. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.

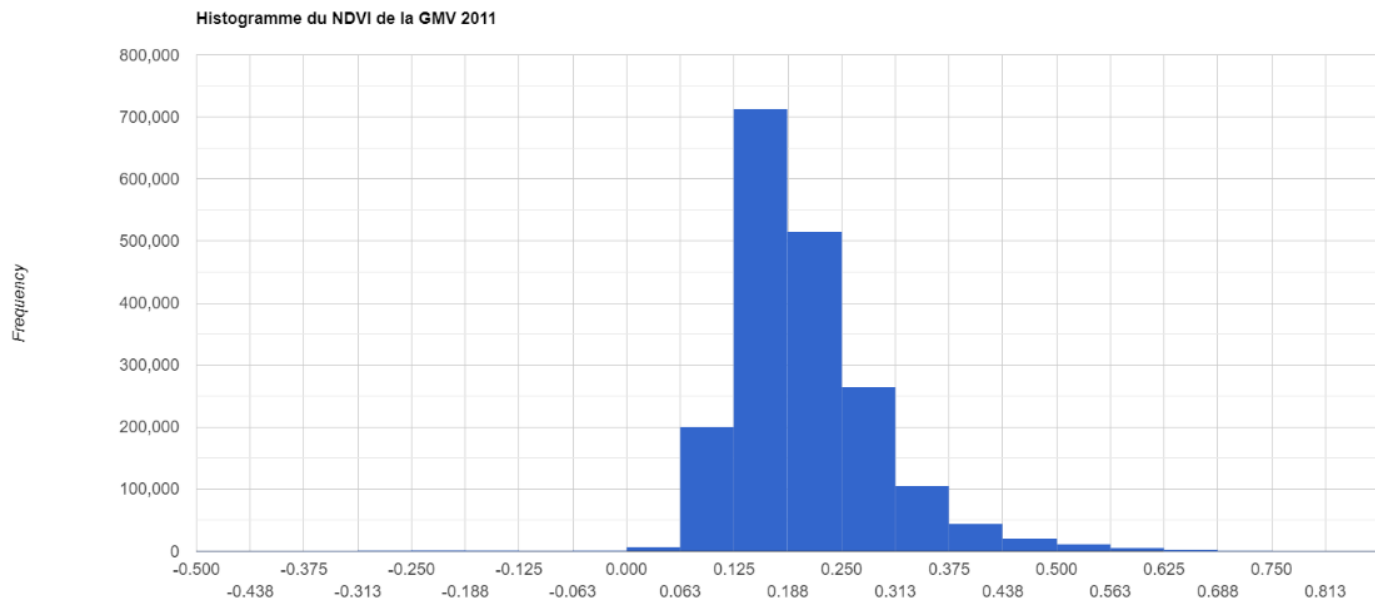


Figure 16 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2011. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.

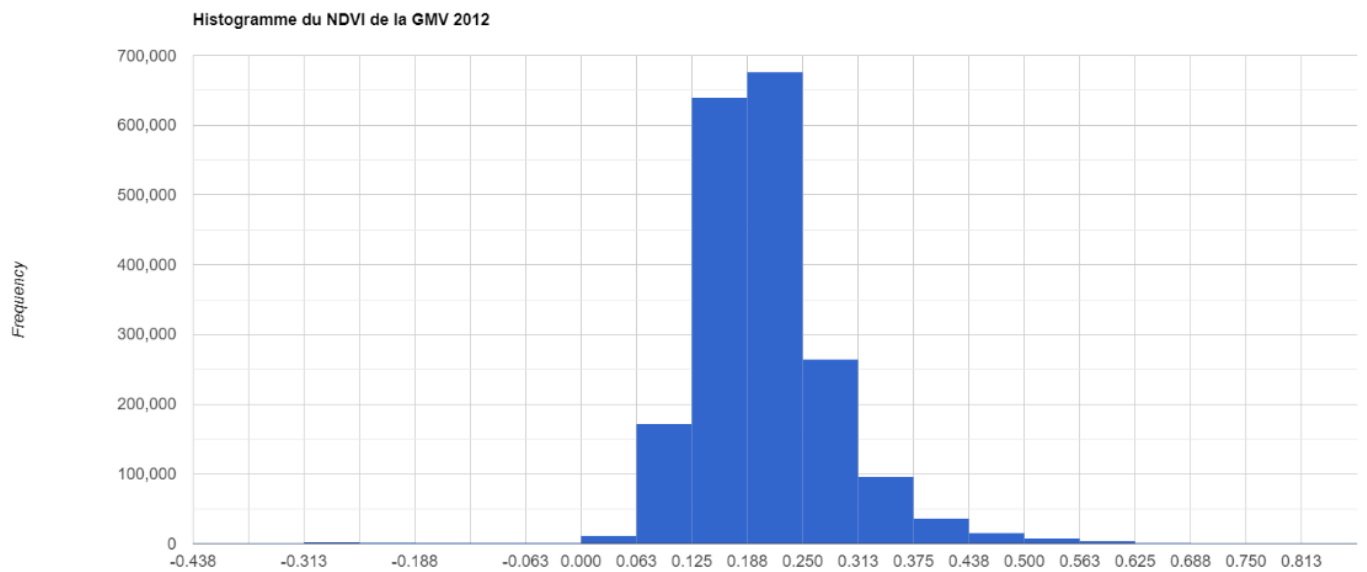


Figure 17 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2012. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.

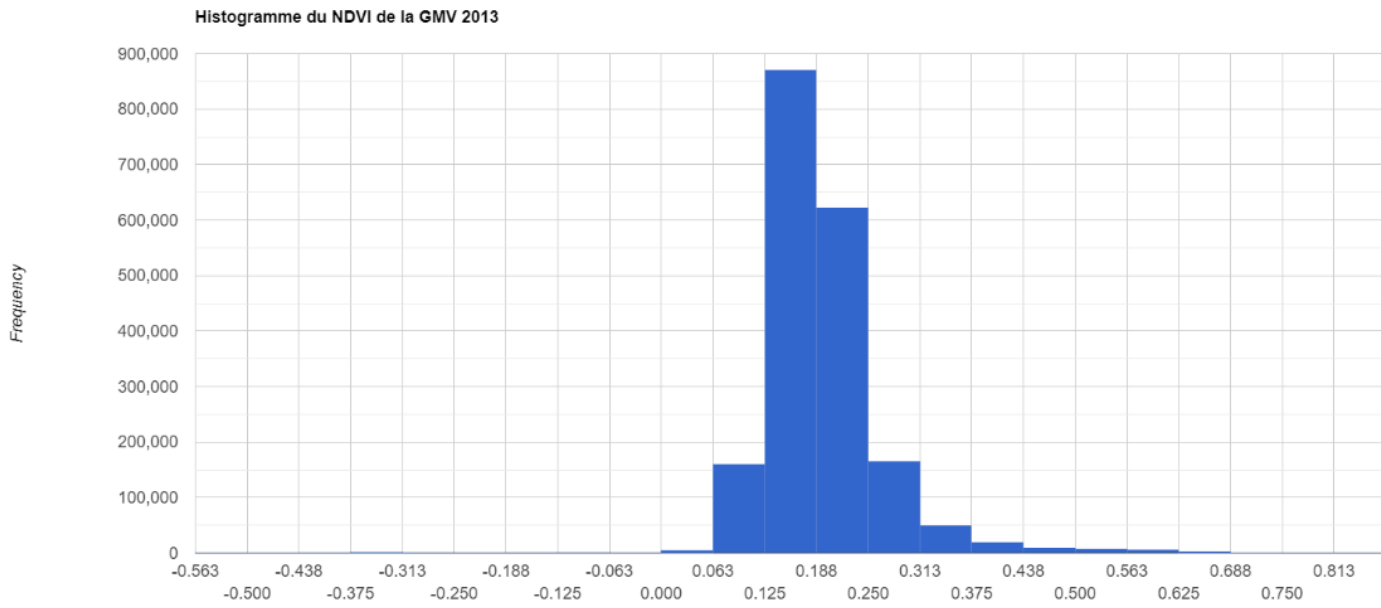


Figure 18 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2013. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.

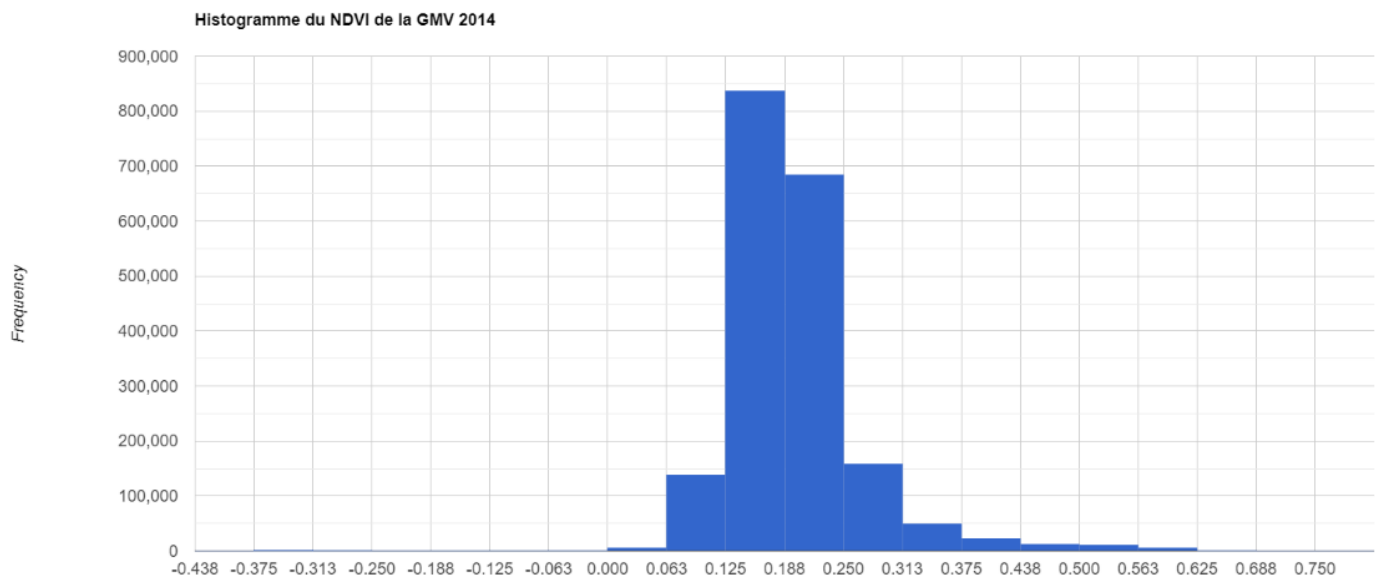


Figure 19 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2014. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.

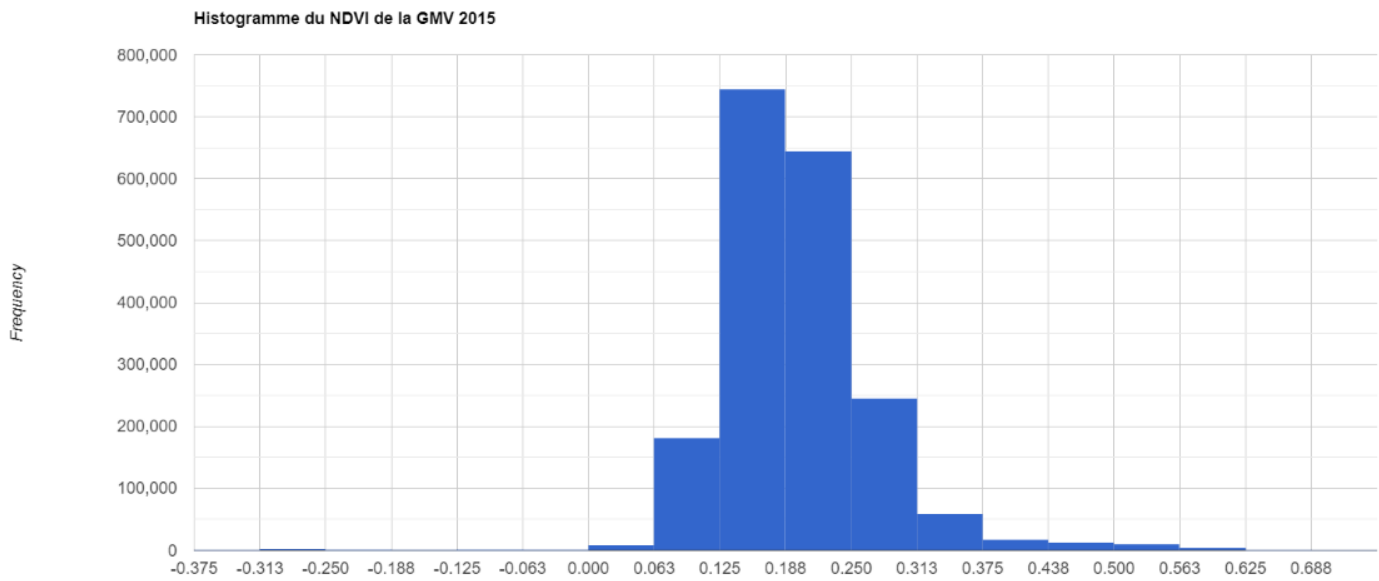


Figure 20 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2015. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.

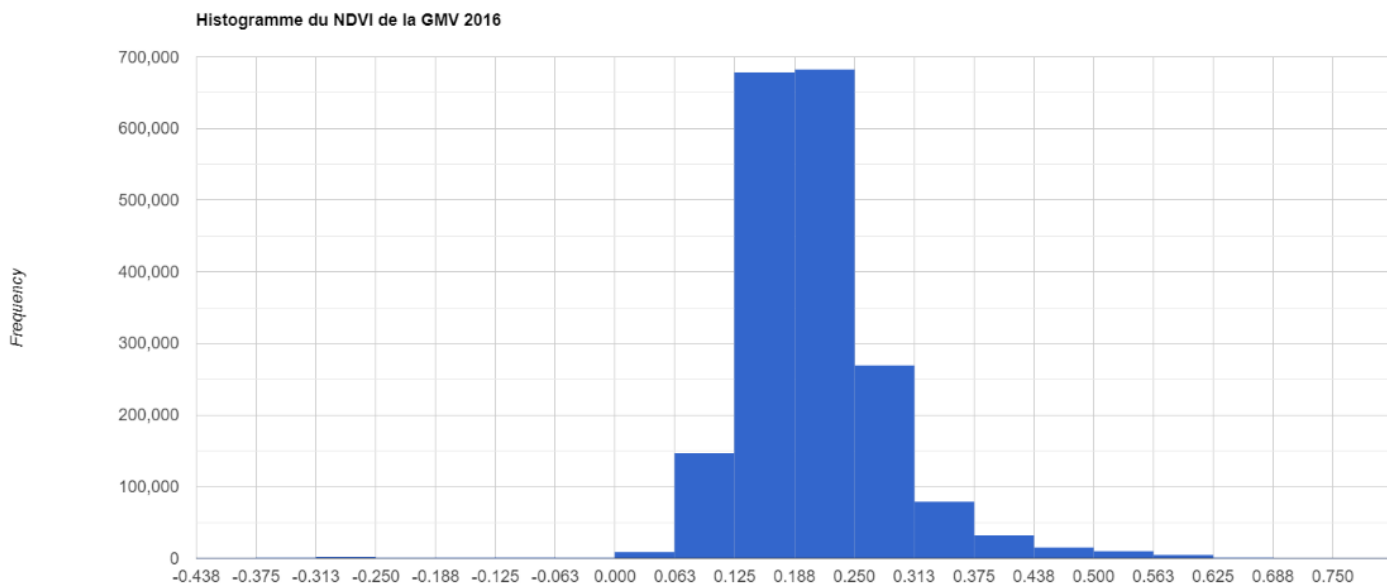


Figure 21 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2016. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.

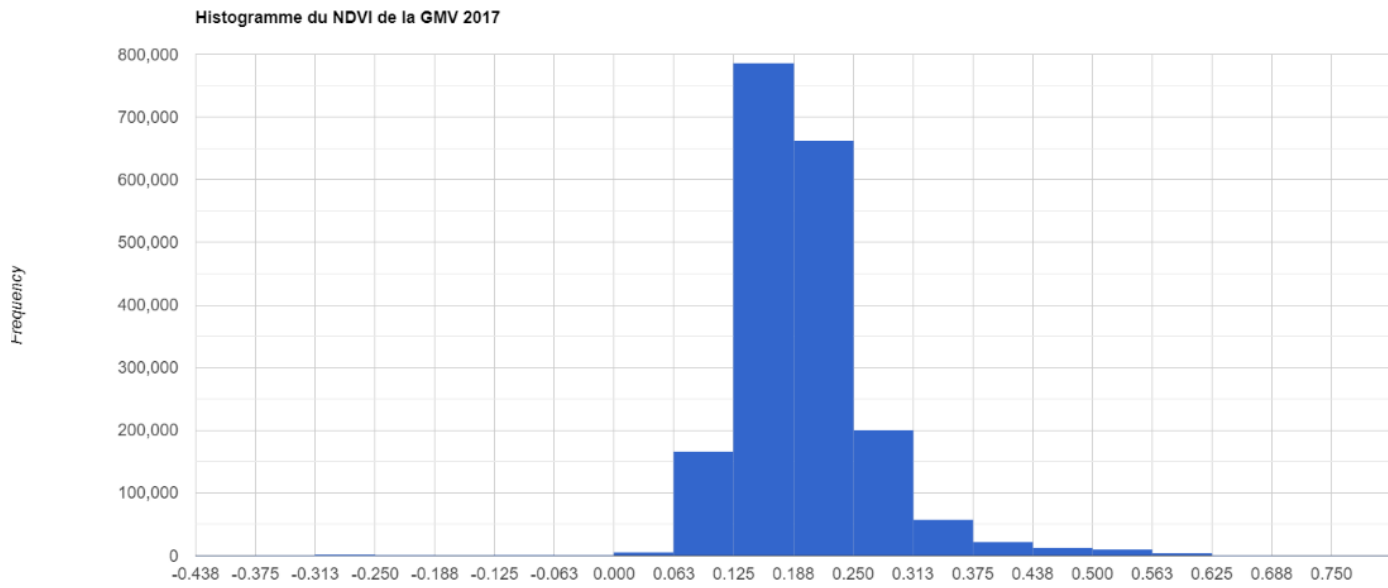


Figure 22 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2017. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.

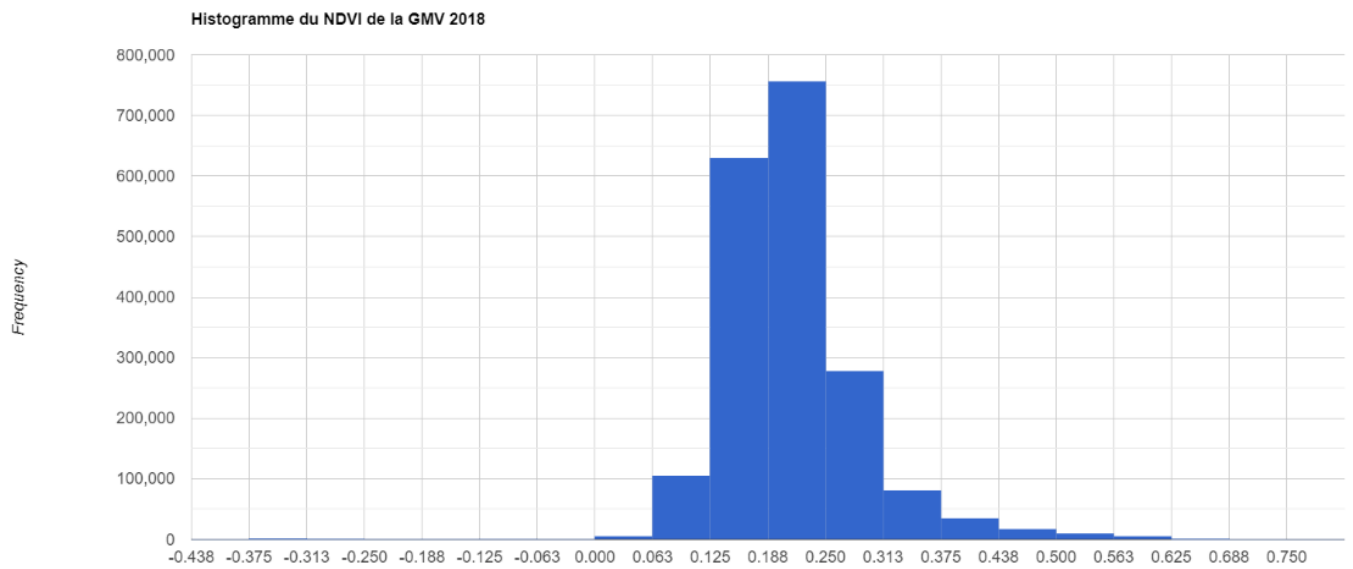


Figure 23 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2018. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.

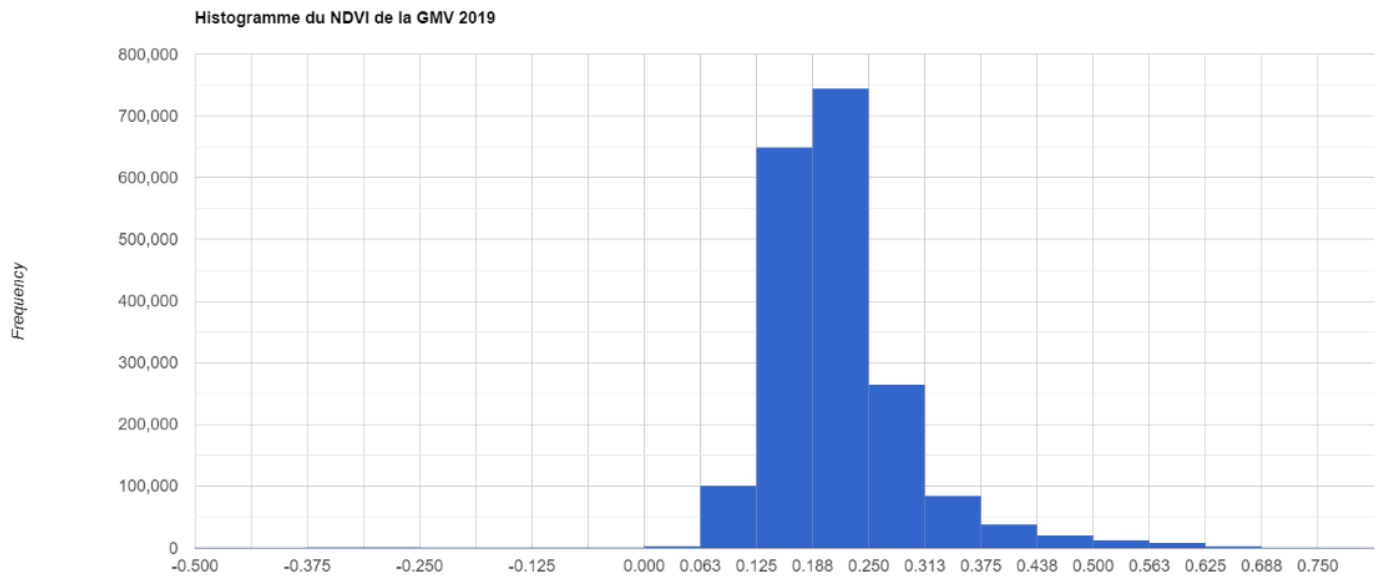


Figure 24 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2019. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.

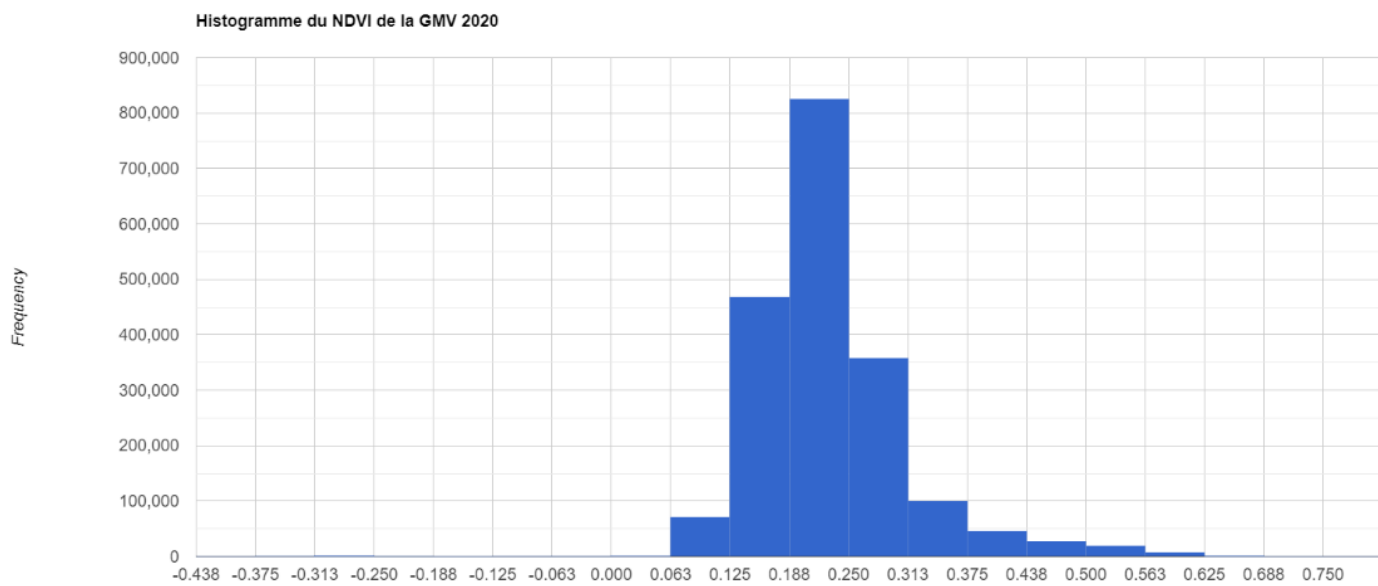


Figure 25 : Histogramme du NDVI pour la Grande Muraille Verte en 2020. En abscisse les valeurs NDVI et en ordonnée le nombre de pixel.

7.3 Séries temporelles

7.3.1 Mauritanie

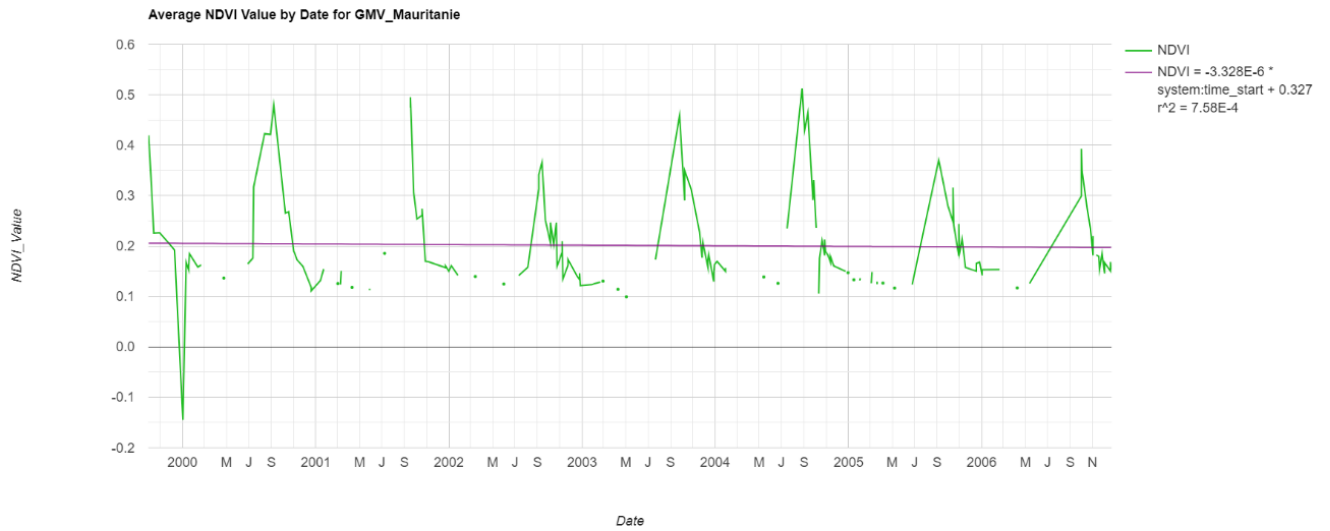


Figure 26 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV en Mauritanie.

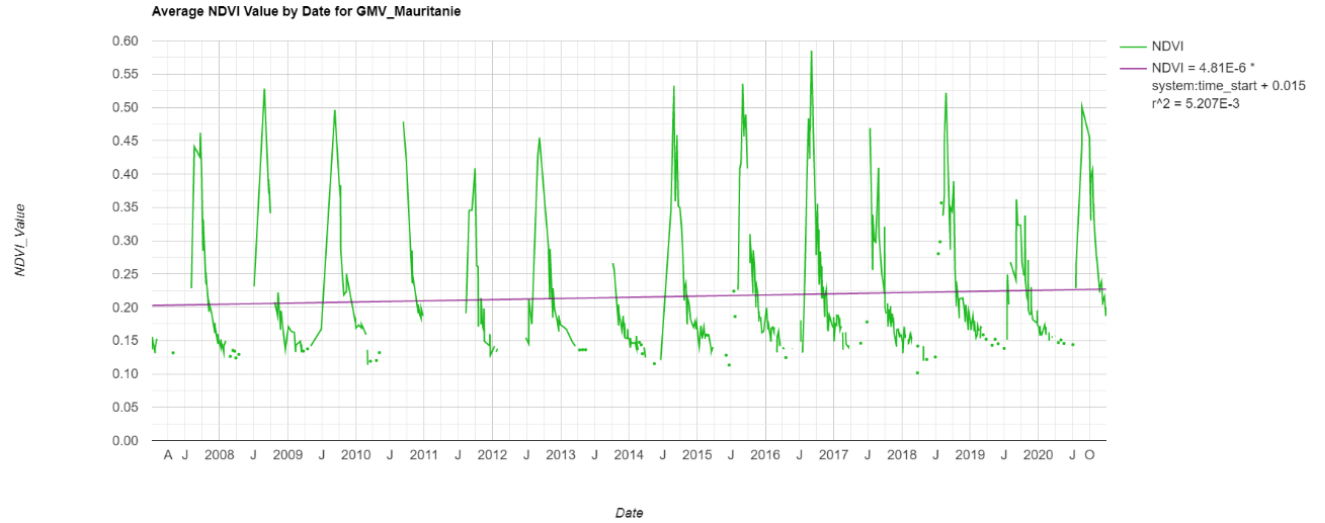


Figure 27 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV en Mauritanie.

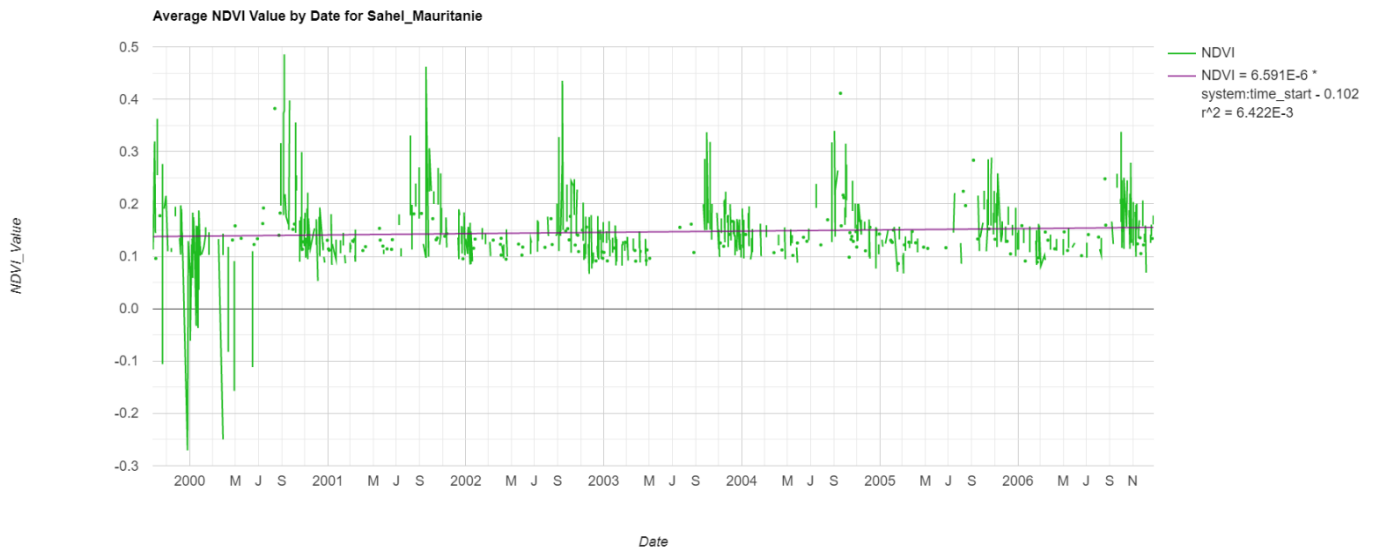


Figure 28 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel en Mauritanie.

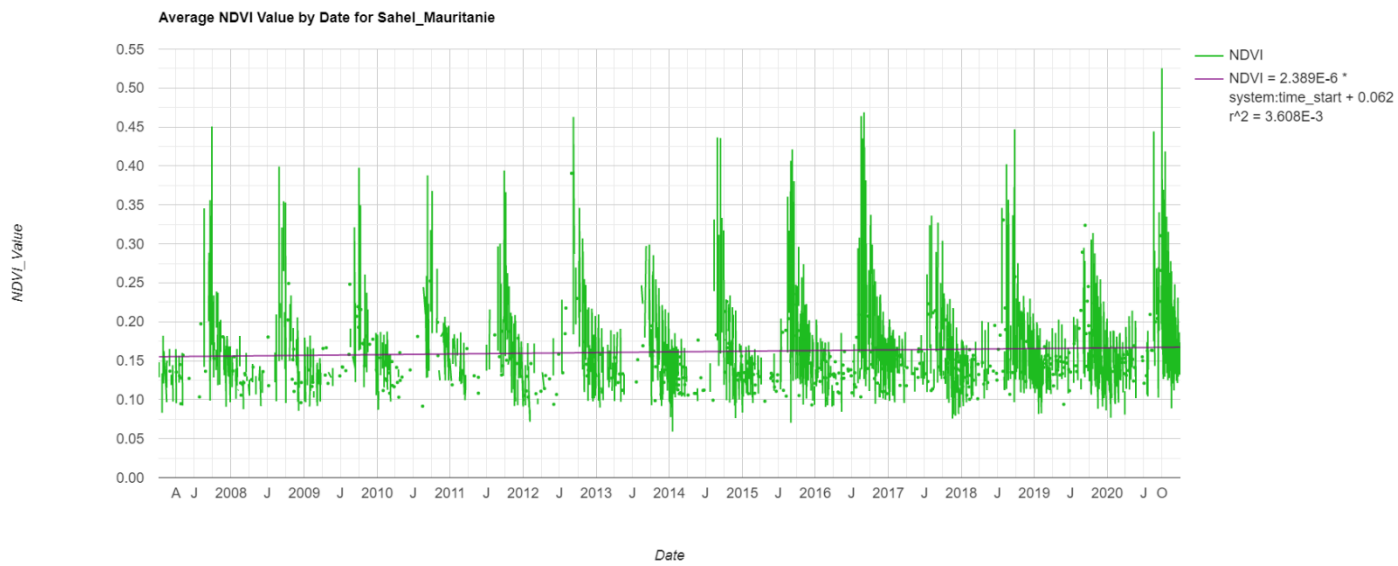


Figure 29 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le Sahel en Mauritanie.

7.3.2 Mali

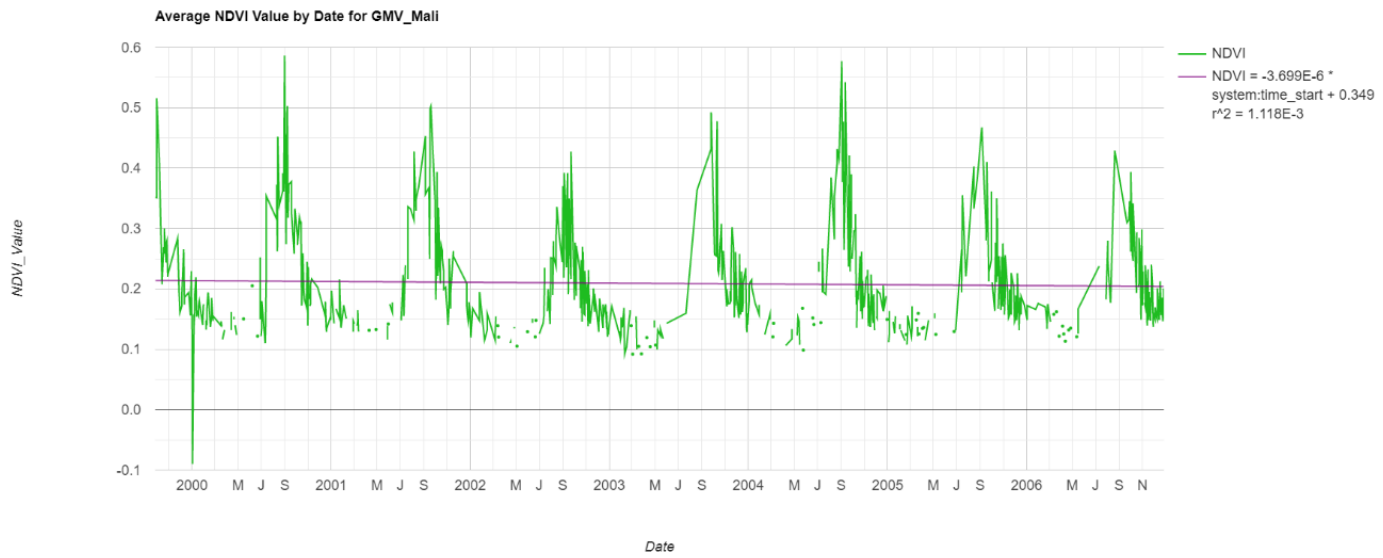


Figure 30 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV au Mali.

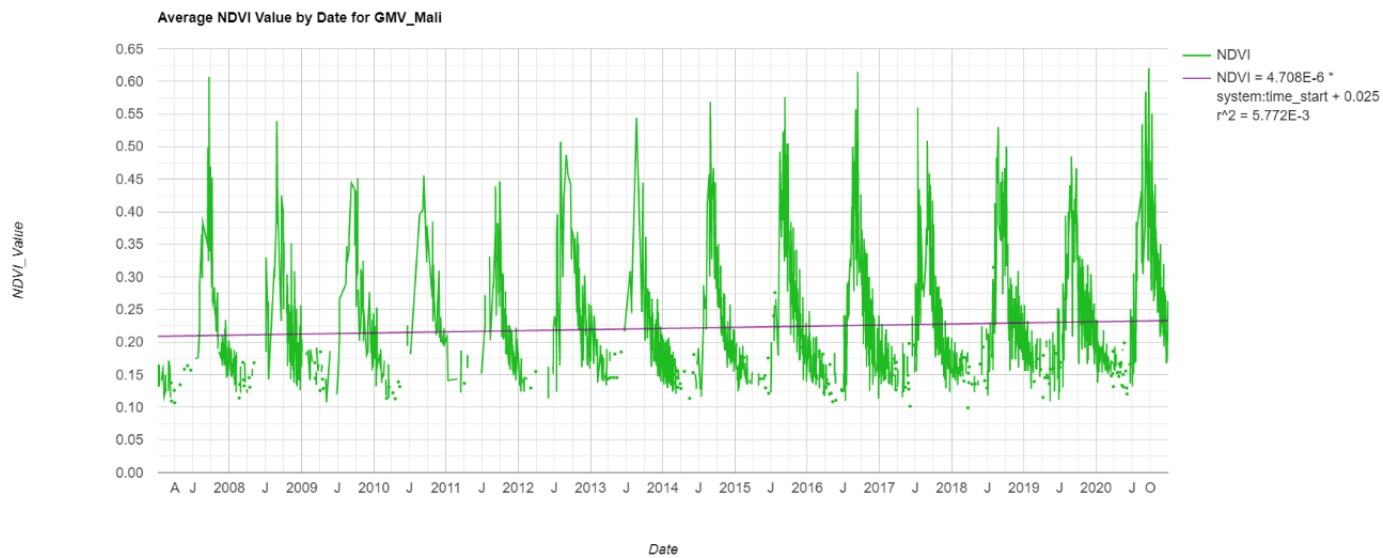


Figure 31 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV au Mali.

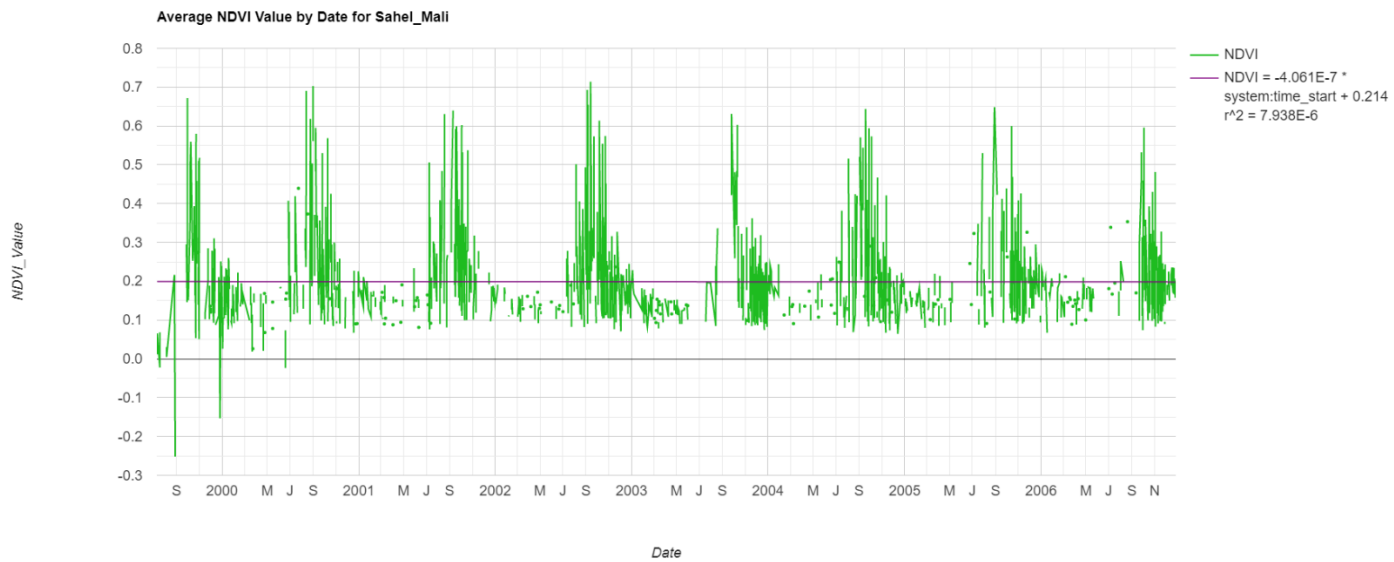


Figure 32 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel au Mali.

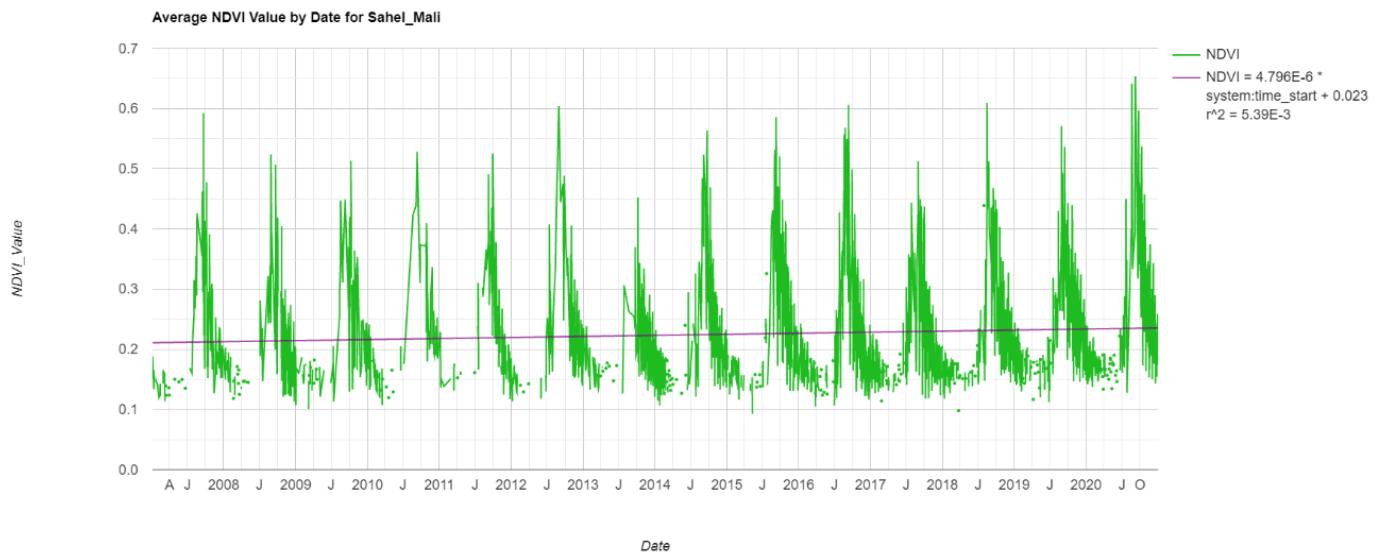


Figure 33 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le sahel au Mali.

7.3.3 Burkina Faso

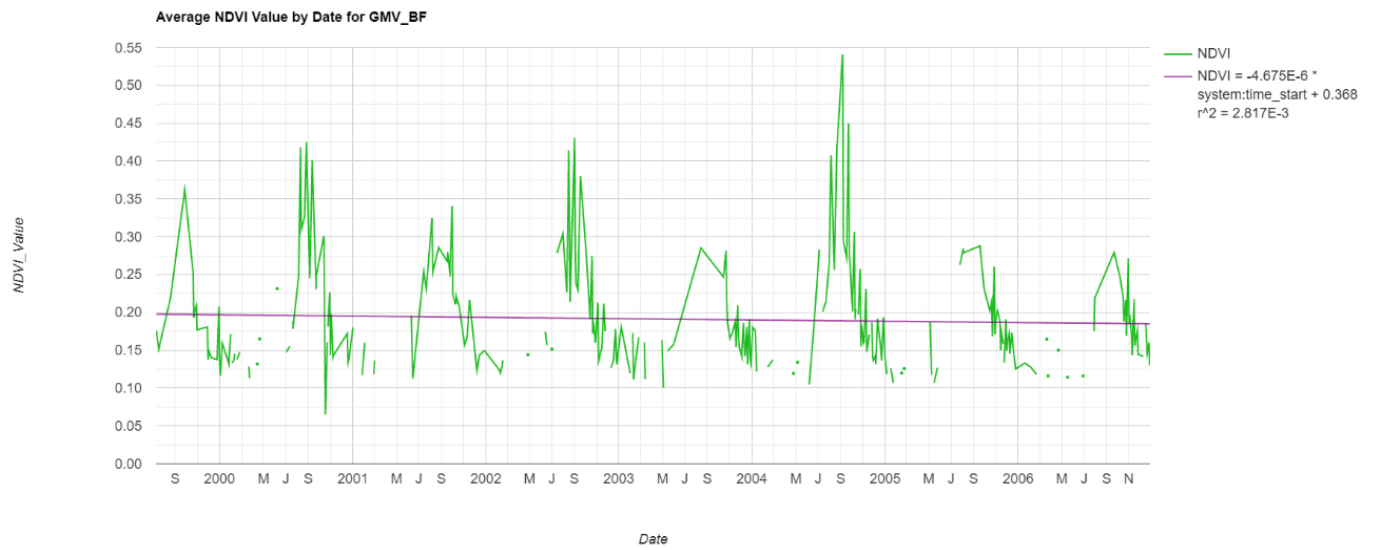


Figure 34 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV au Burkina Faso.

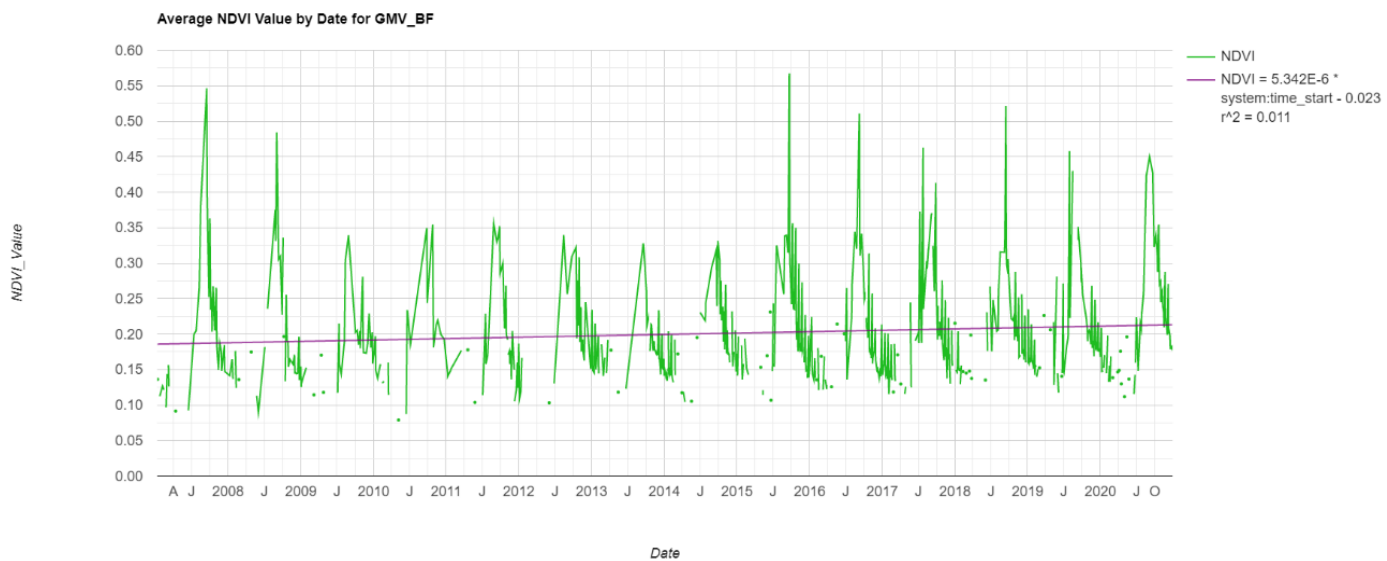


Figure 35 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV au Burkina Faso.

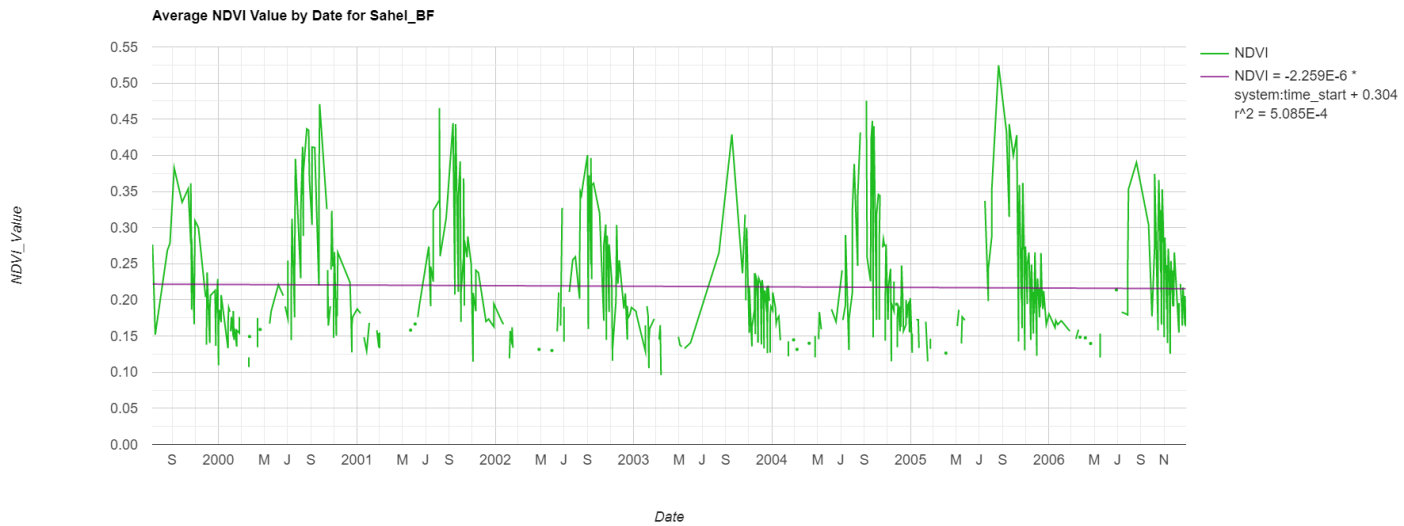


Figure 36 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel au Burkina Faso.

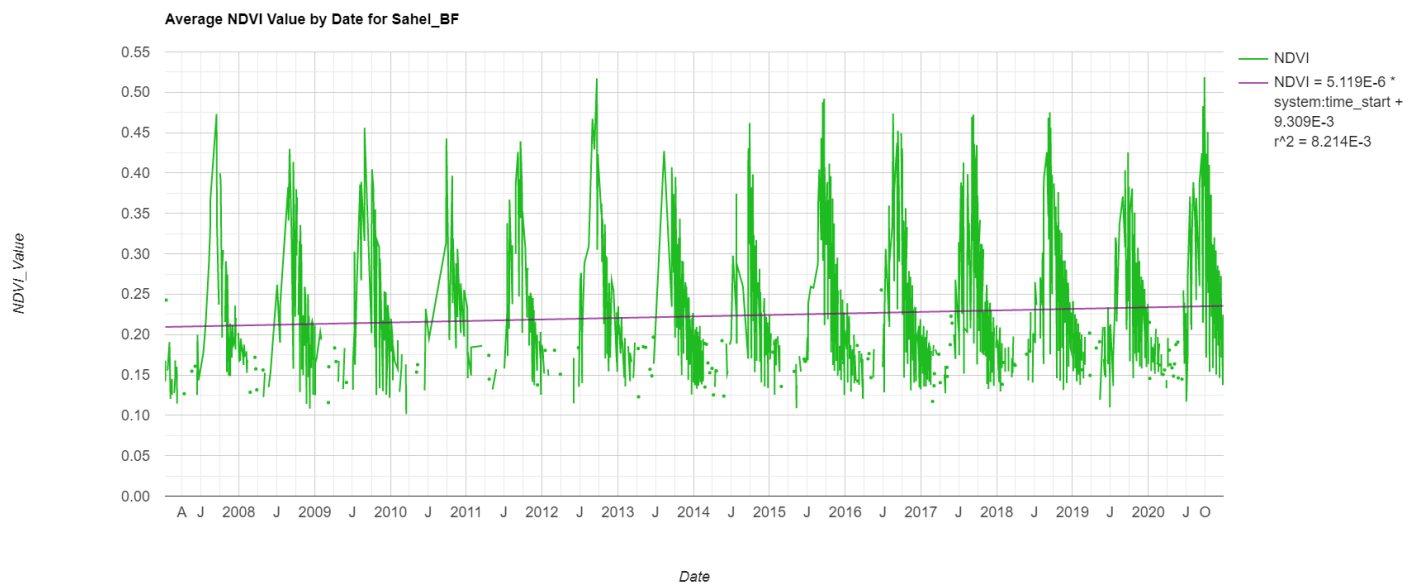


Figure 37-: Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le Sahel au Burkina Faso.

7.3.4 Niger

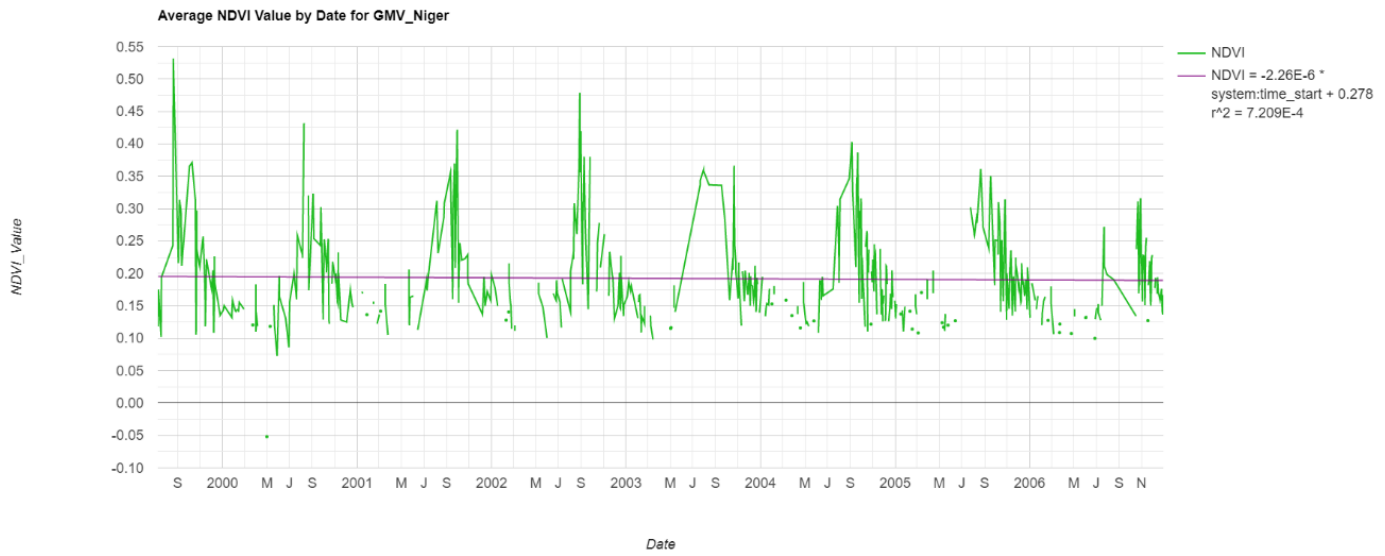


Figure 38 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV au Niger.

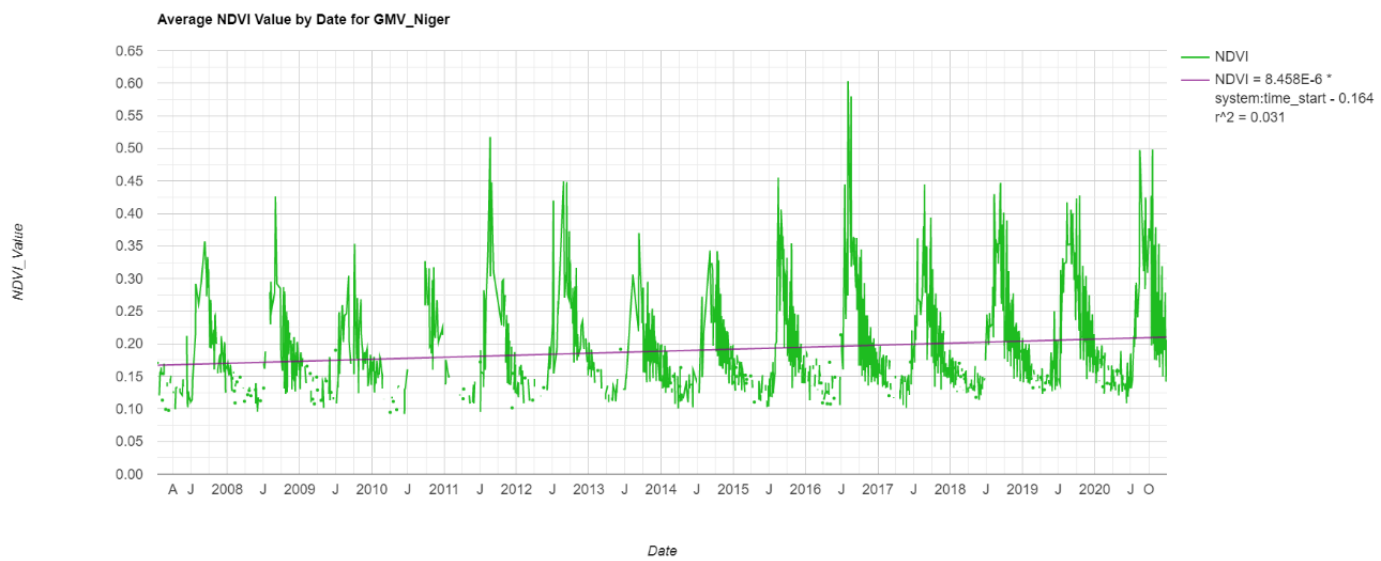


Figure 39 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV au Niger.

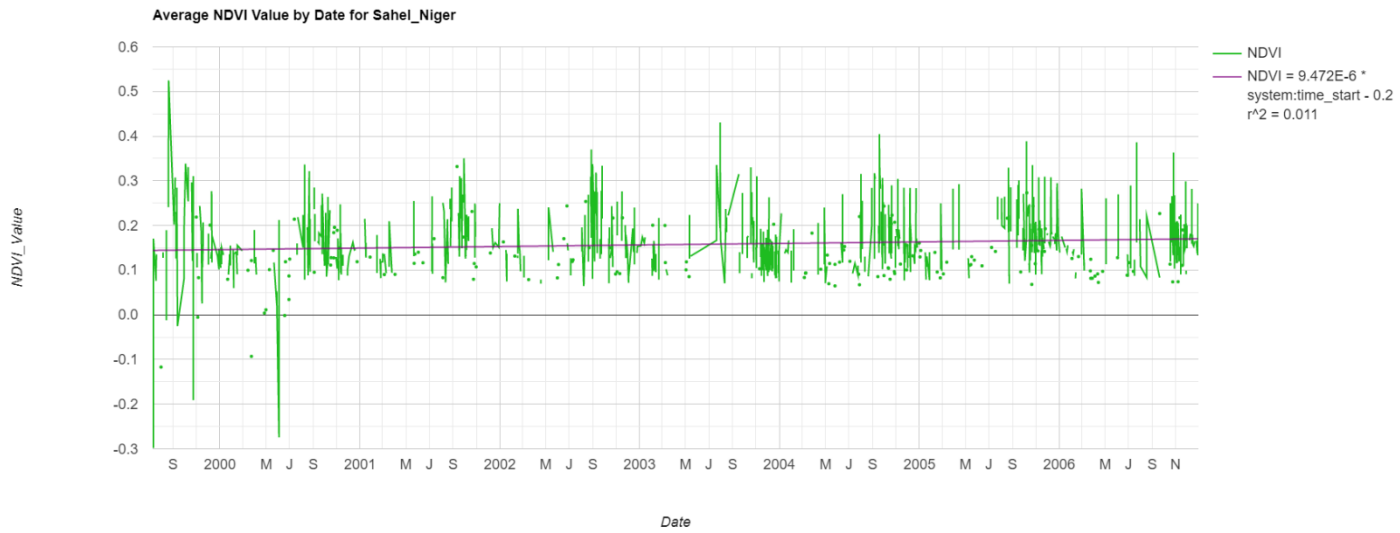


Figure 40 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel au Niger.

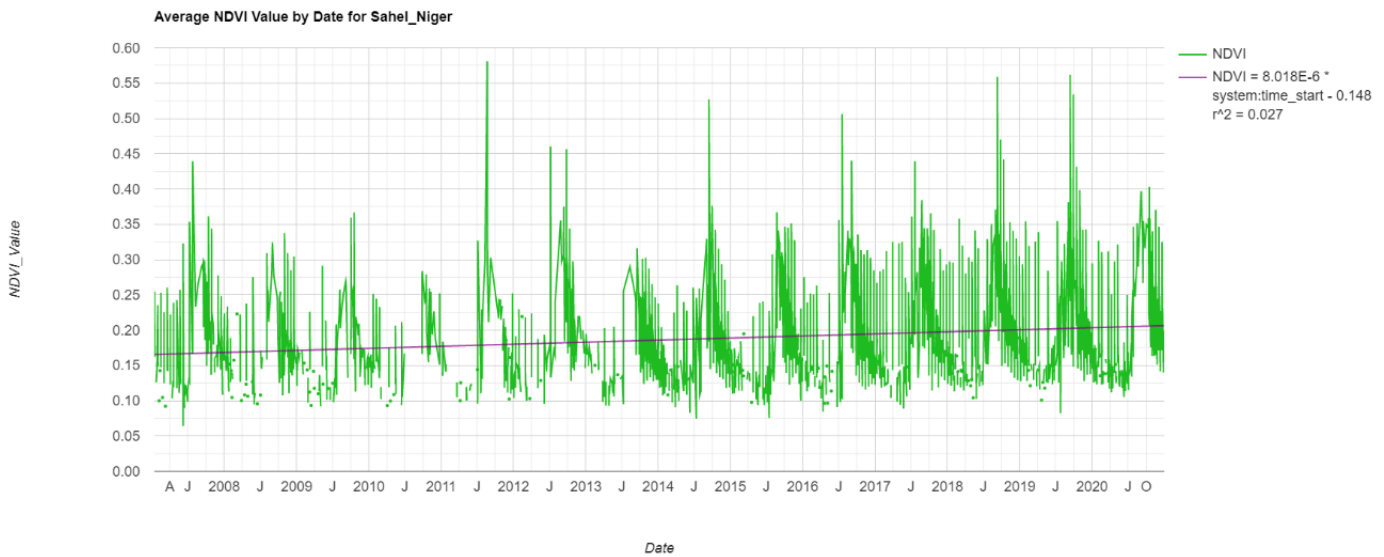


Figure 41 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le Sahel au Niger.

7.3.5 Nigeria

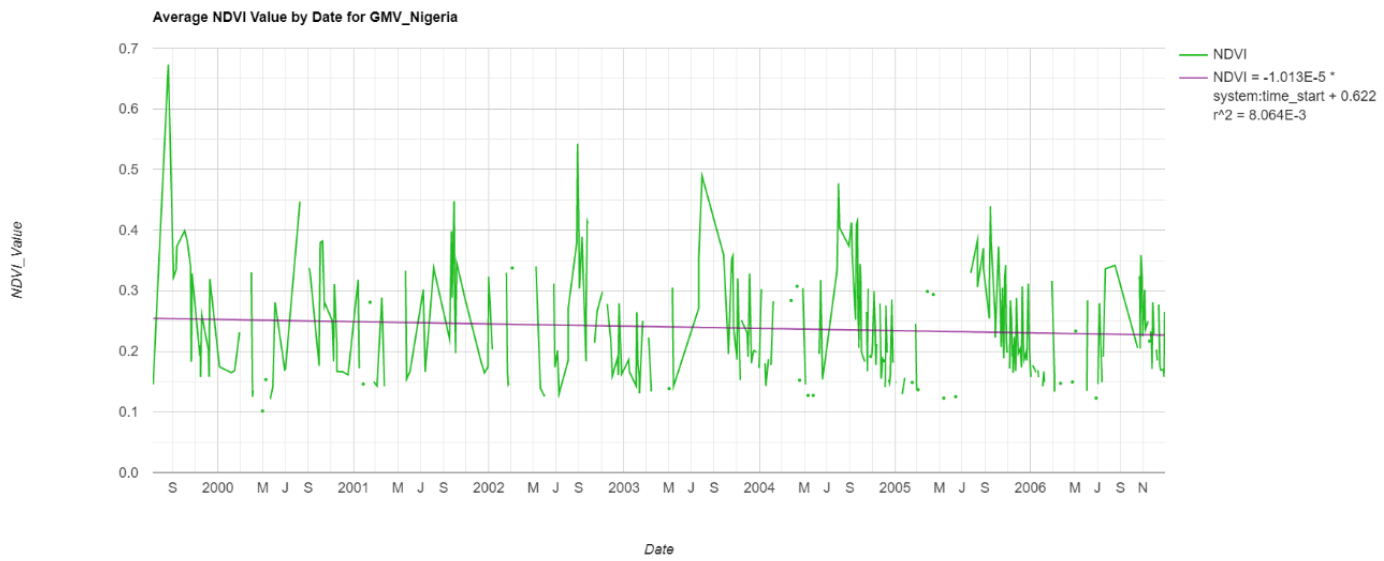


Figure 42 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV au Nigeria.

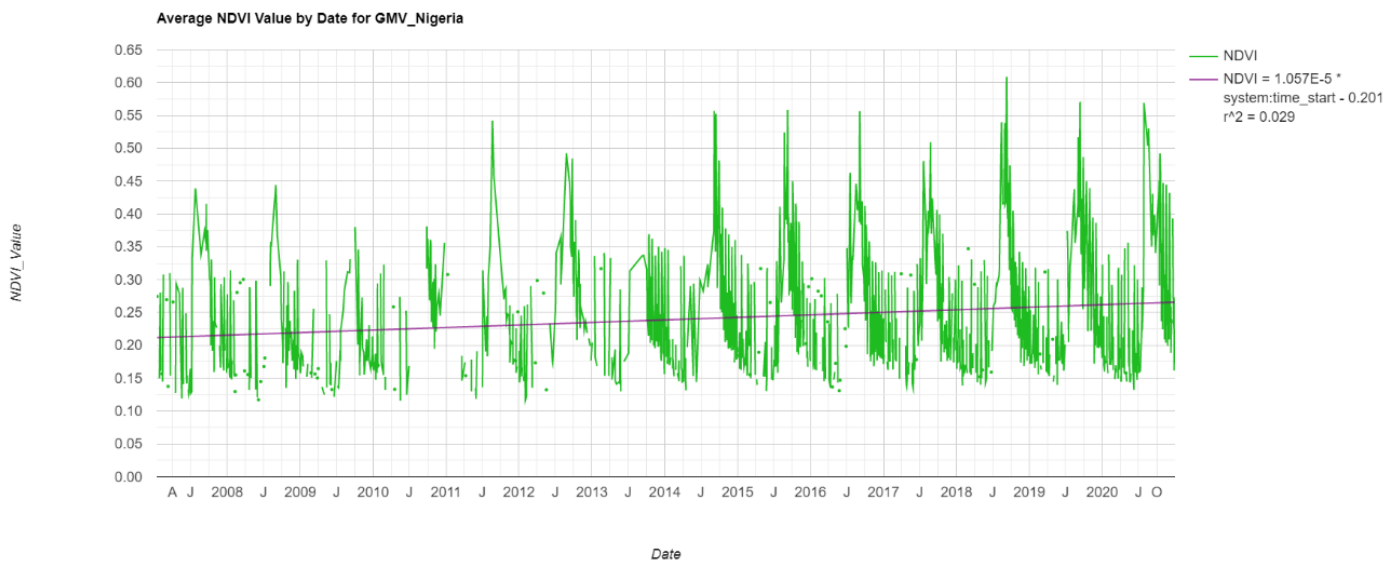


Figure 43 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV au Nigeria.

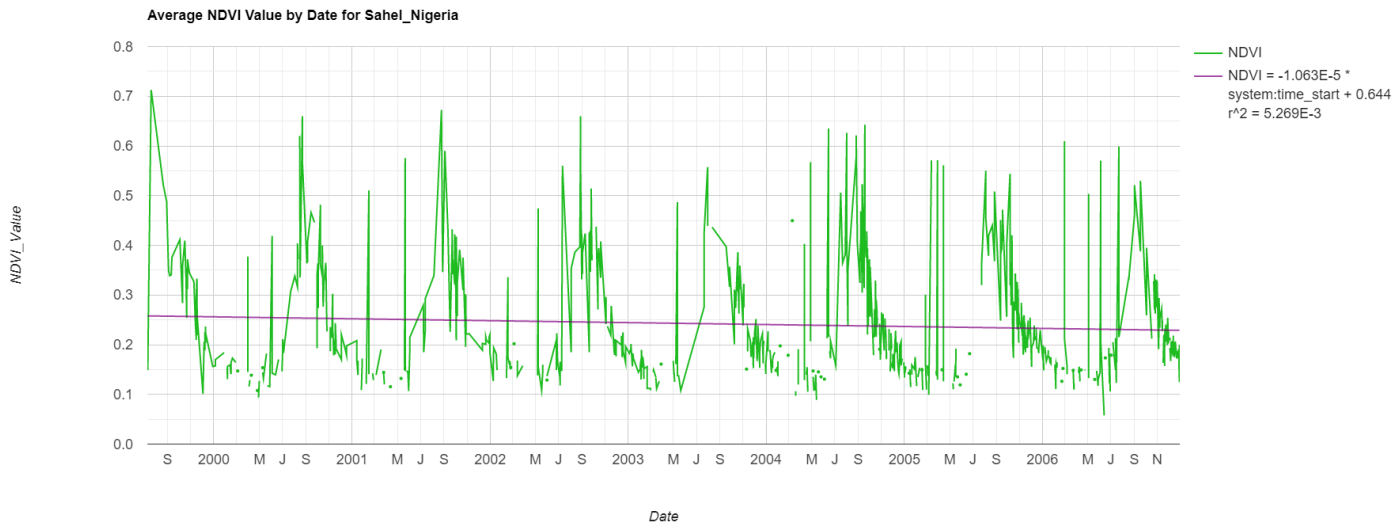


Figure 44 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel au Nigeria.

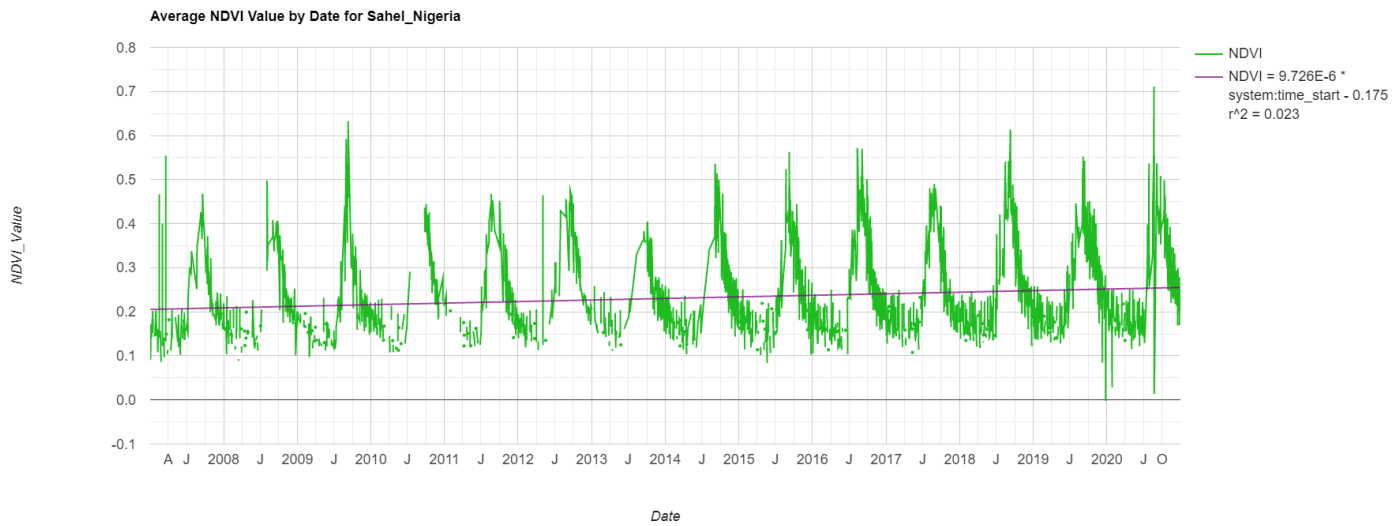


Figure 45 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le Sahel au Nigeria.

7.3.6 Cameroun

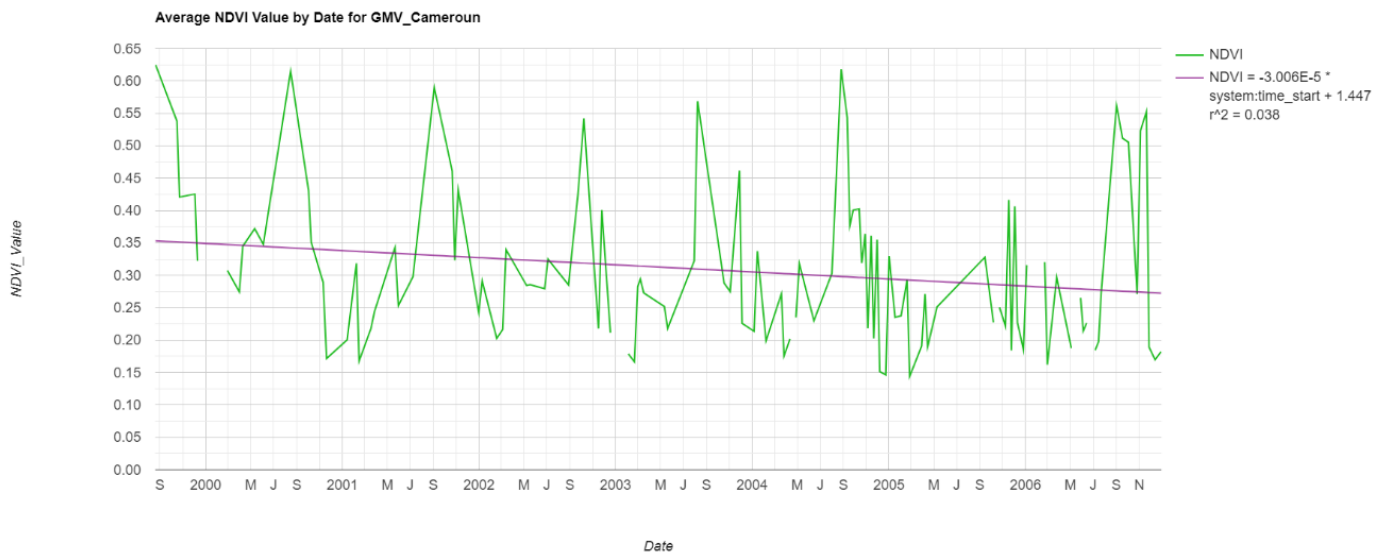


Figure 46 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV au Cameroun.

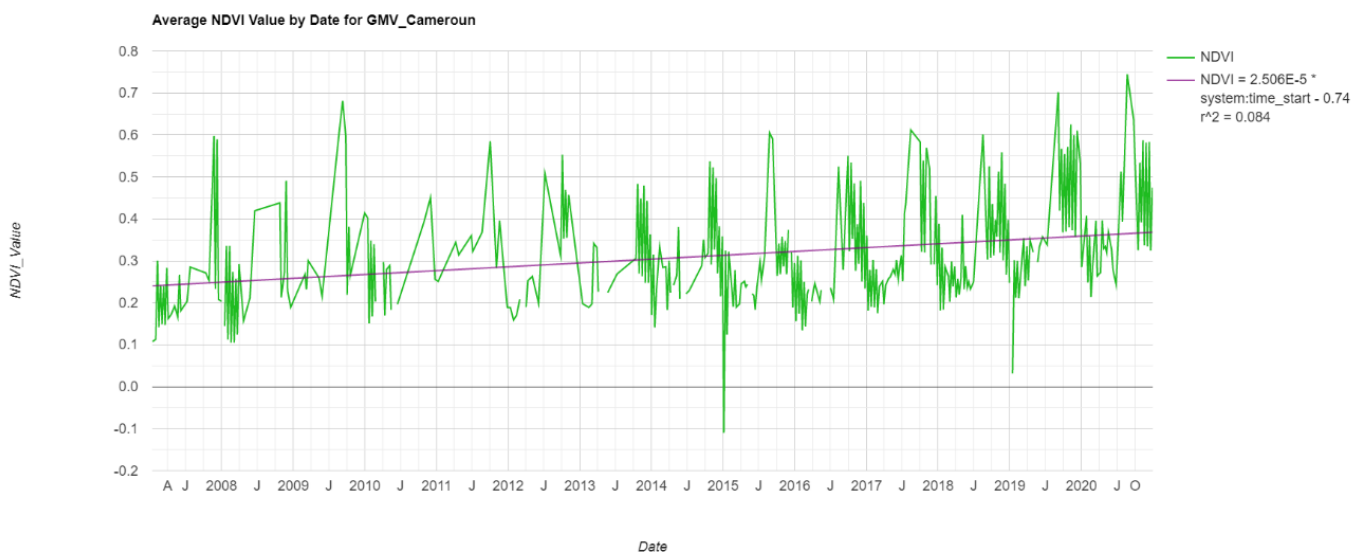


Figure 47 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV au Cameroun.

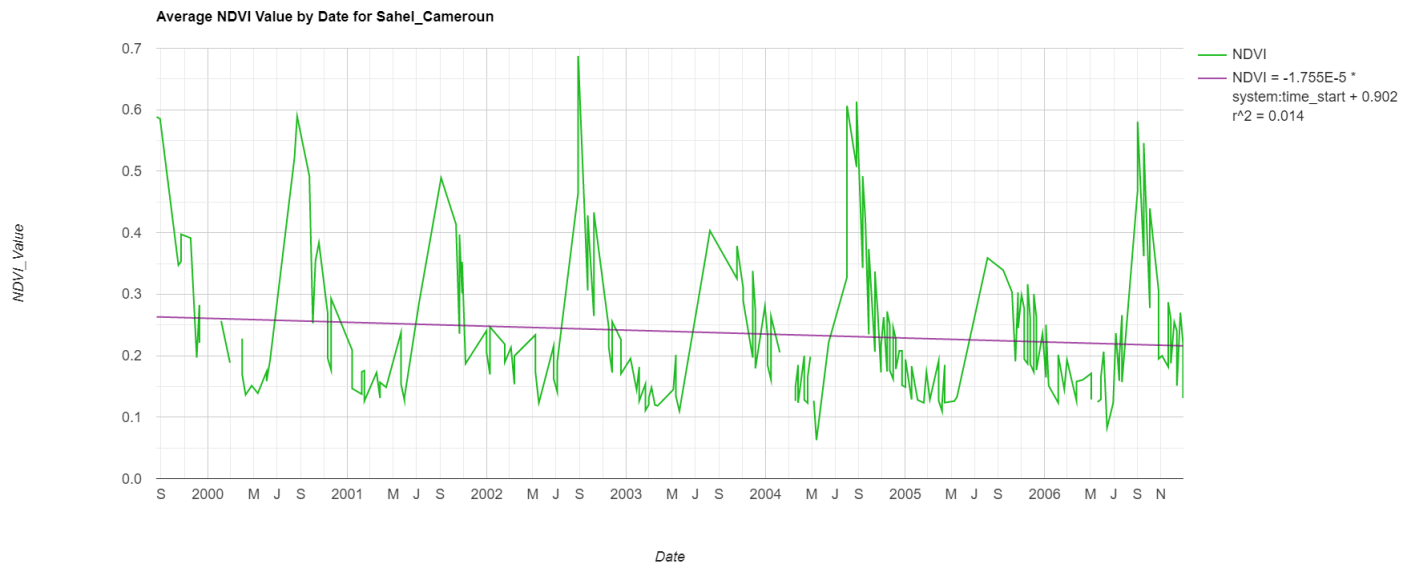


Figure 48 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel au Cameroun.

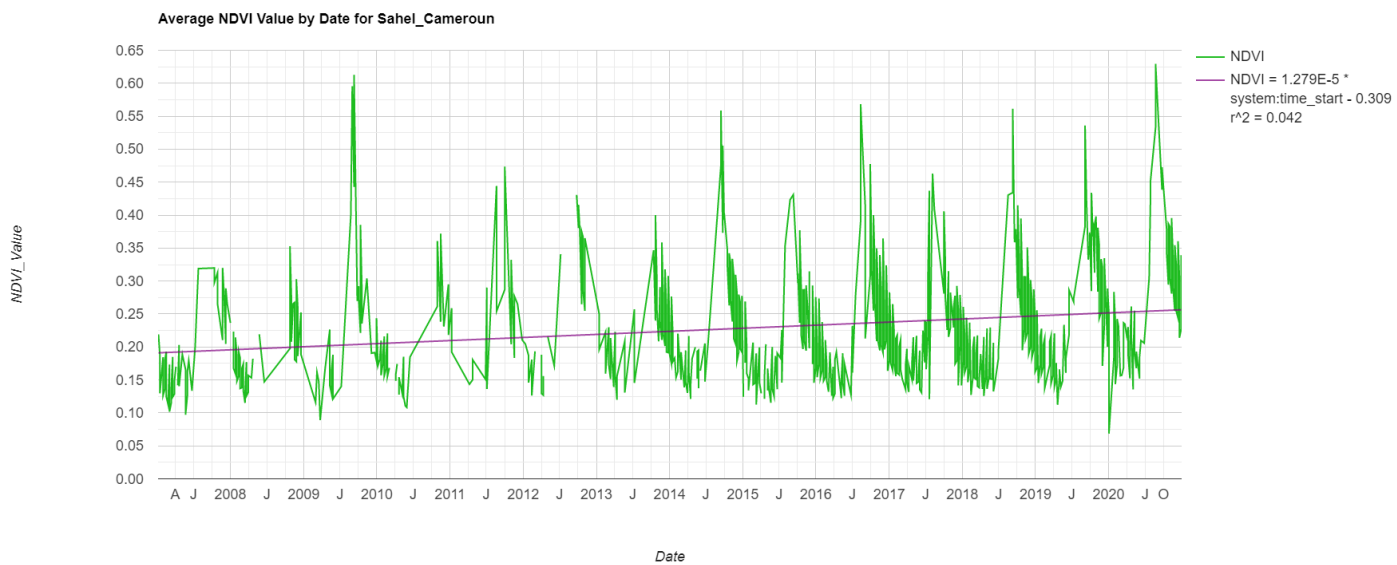


Figure 49 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le Sahel au Cameroun.

7.3.7 Tchad

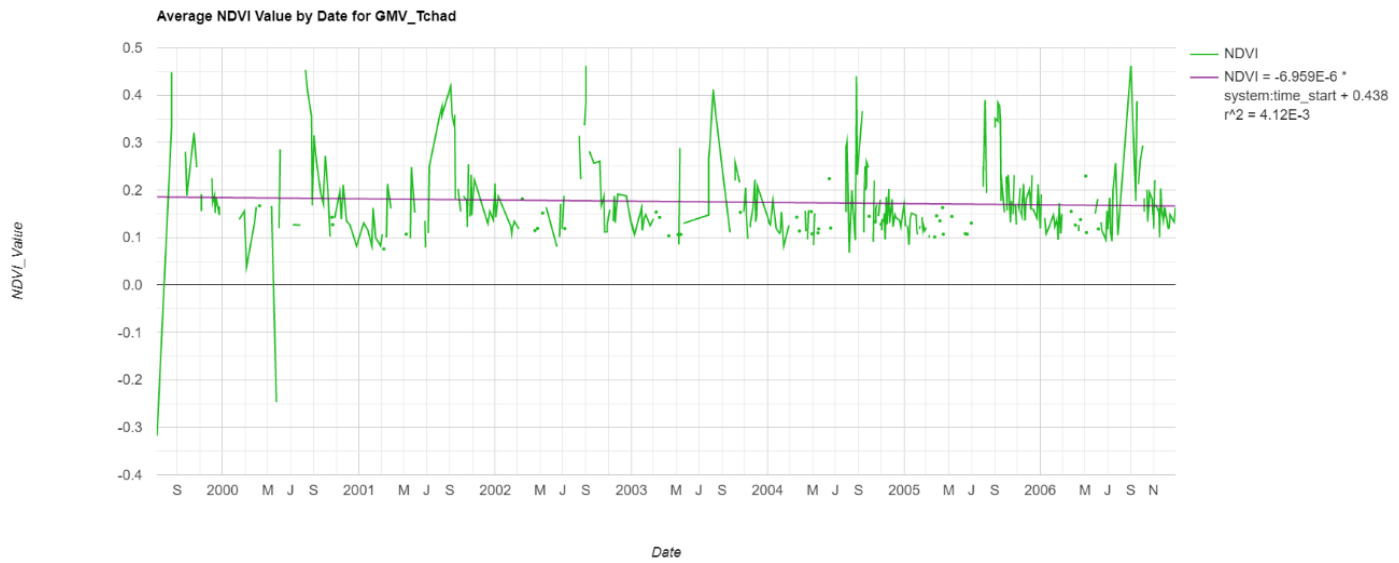


Figure 50 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV au Tchad.

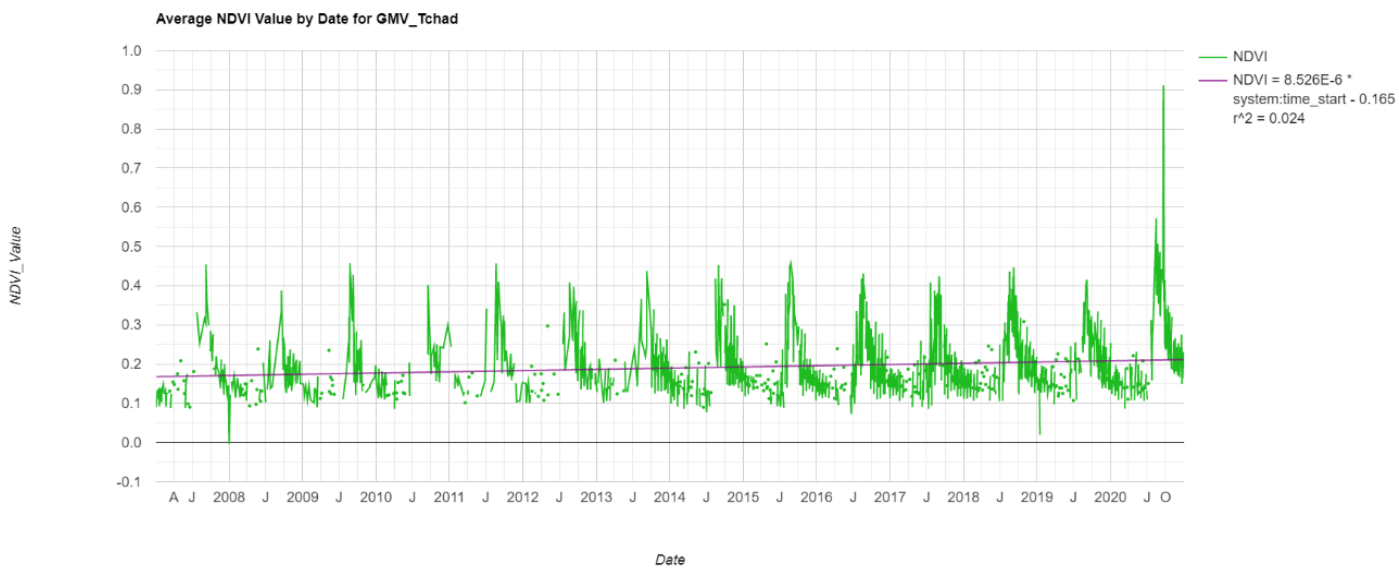


Figure 51 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV au Tchad.

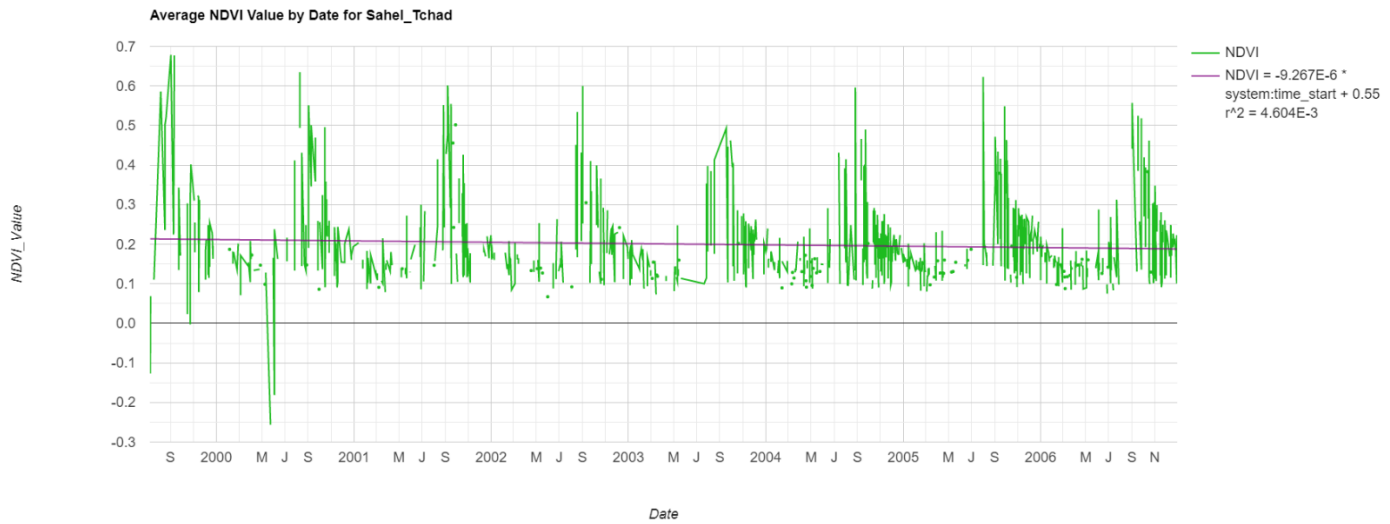


Figure 52 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel au Tchad.

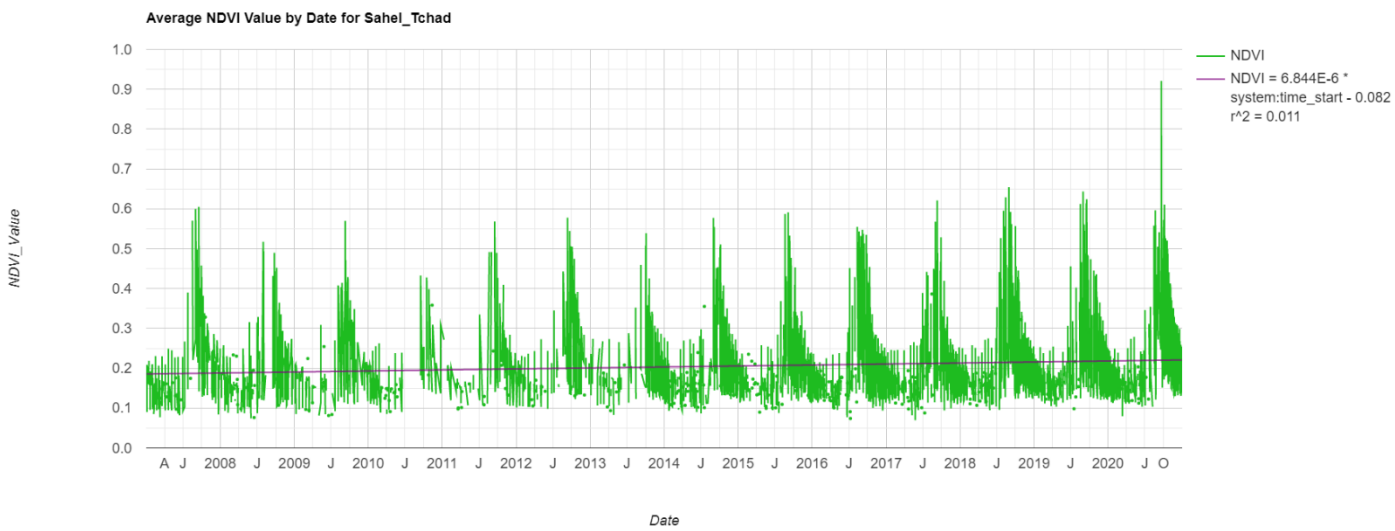


Figure 53 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le Sahel au Tchad.

7.3.8 Soudan

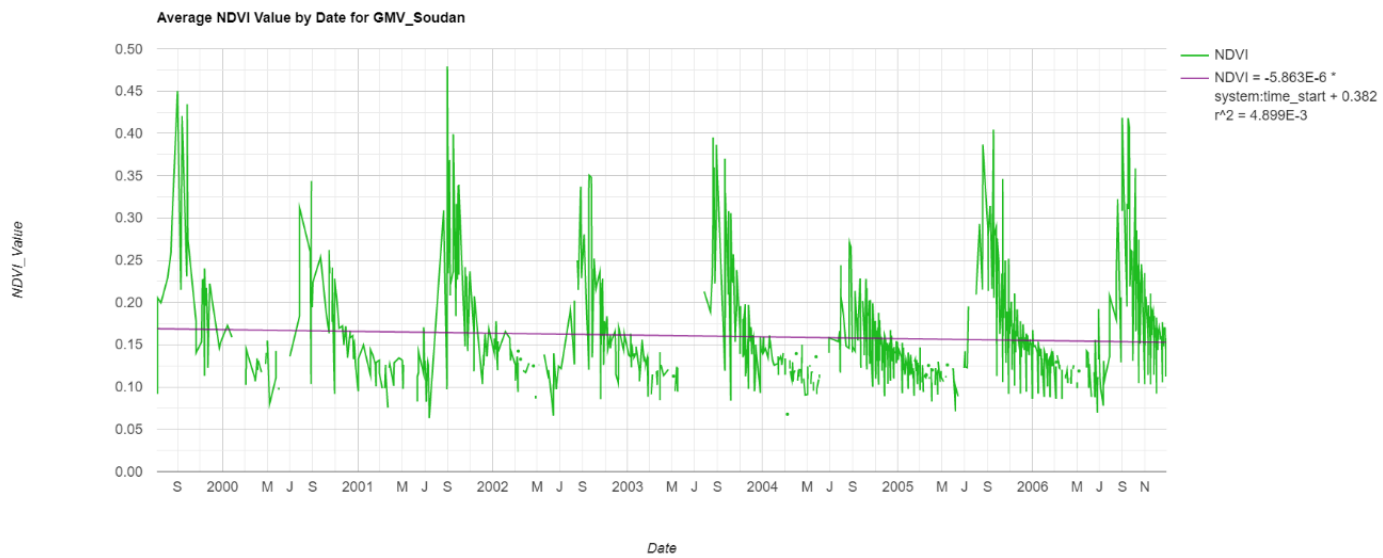


Figure 54 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV au Soudan.

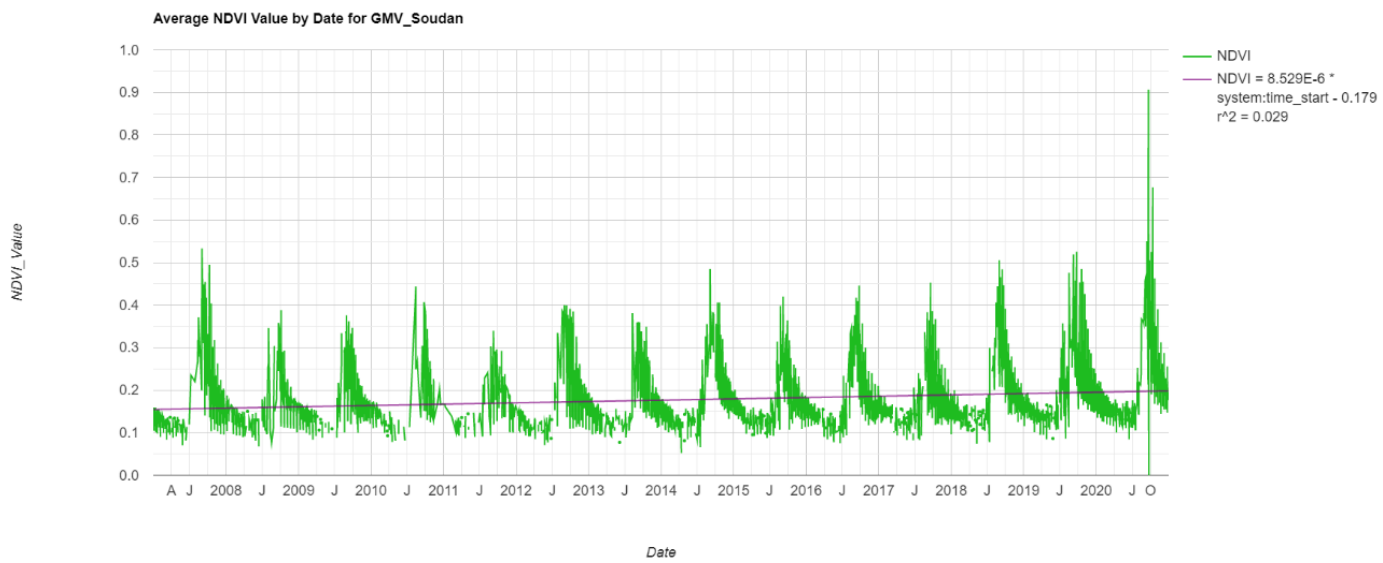


Figure 55 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV au Soudan.

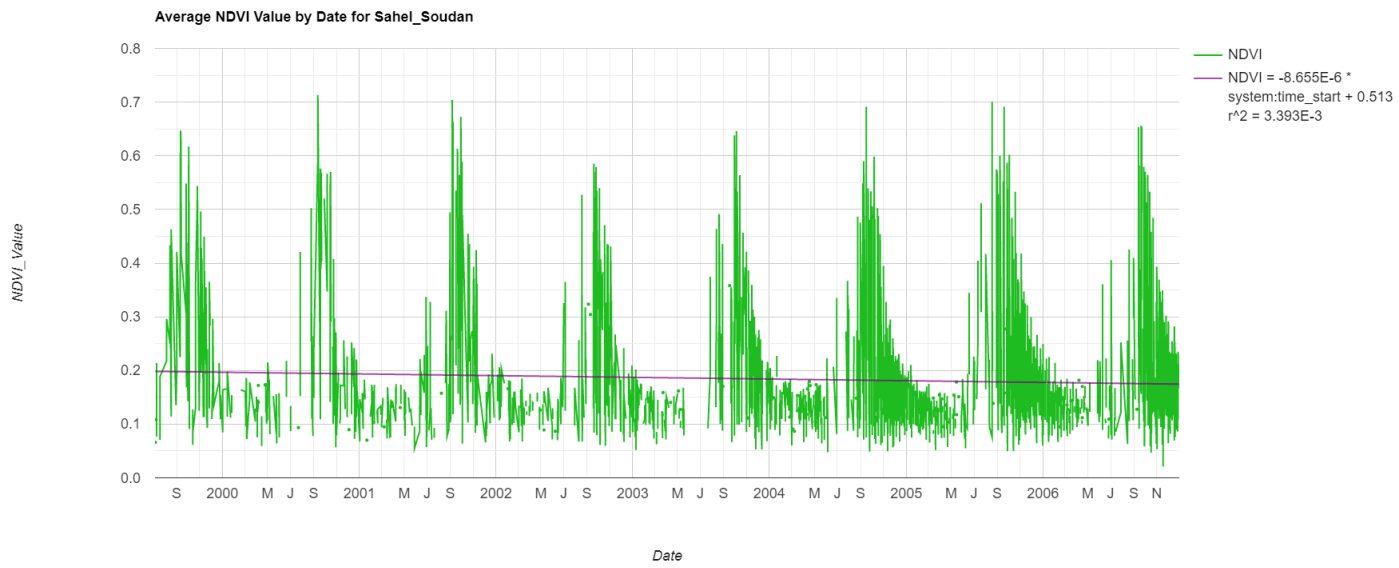


Figure 56 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel au Soudan.

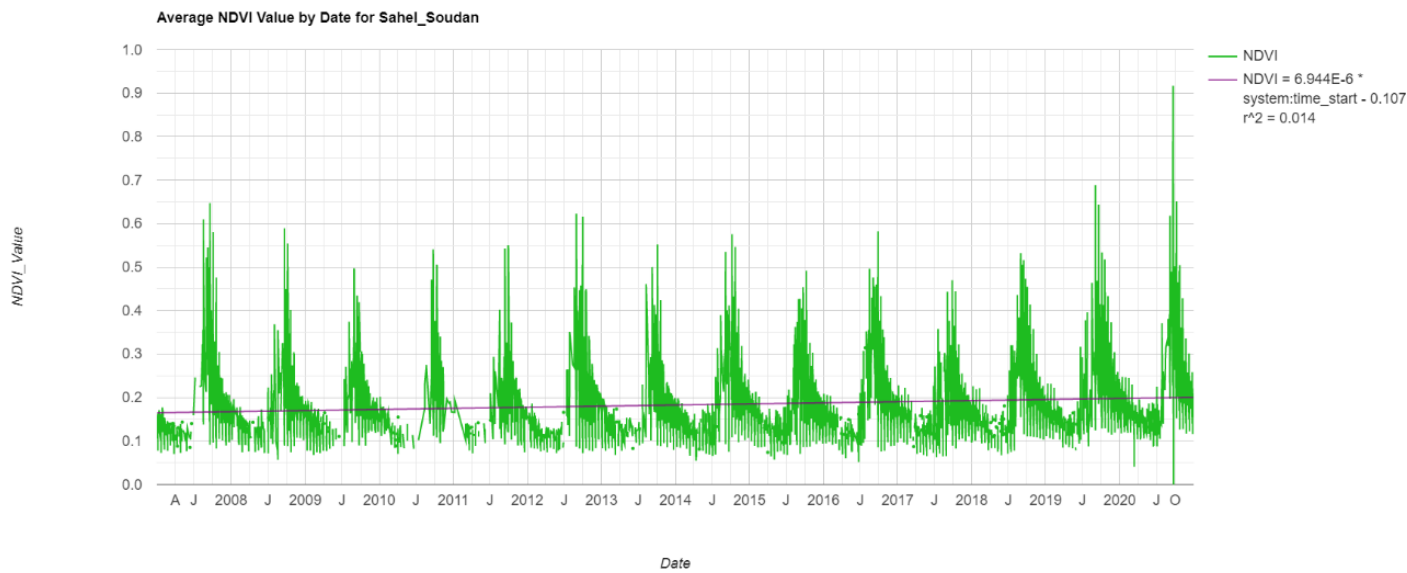


Figure 57 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le Sahel au Soudan.

7.3.9 Erythrée

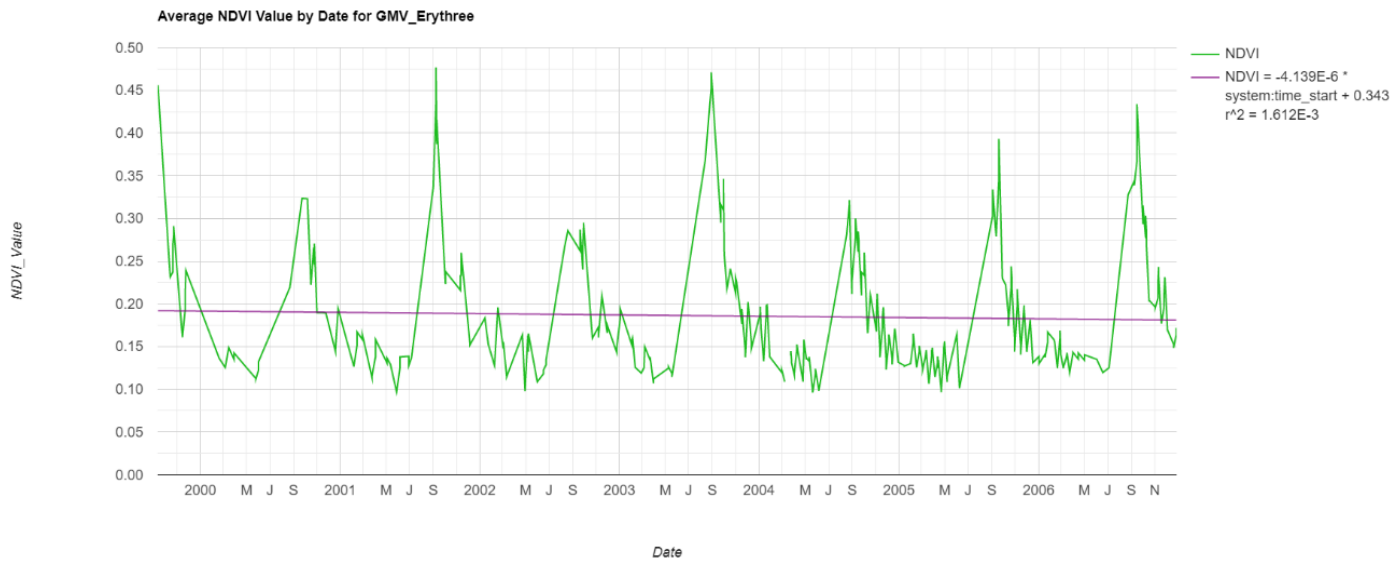


Figure 58 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV en Erythrée.

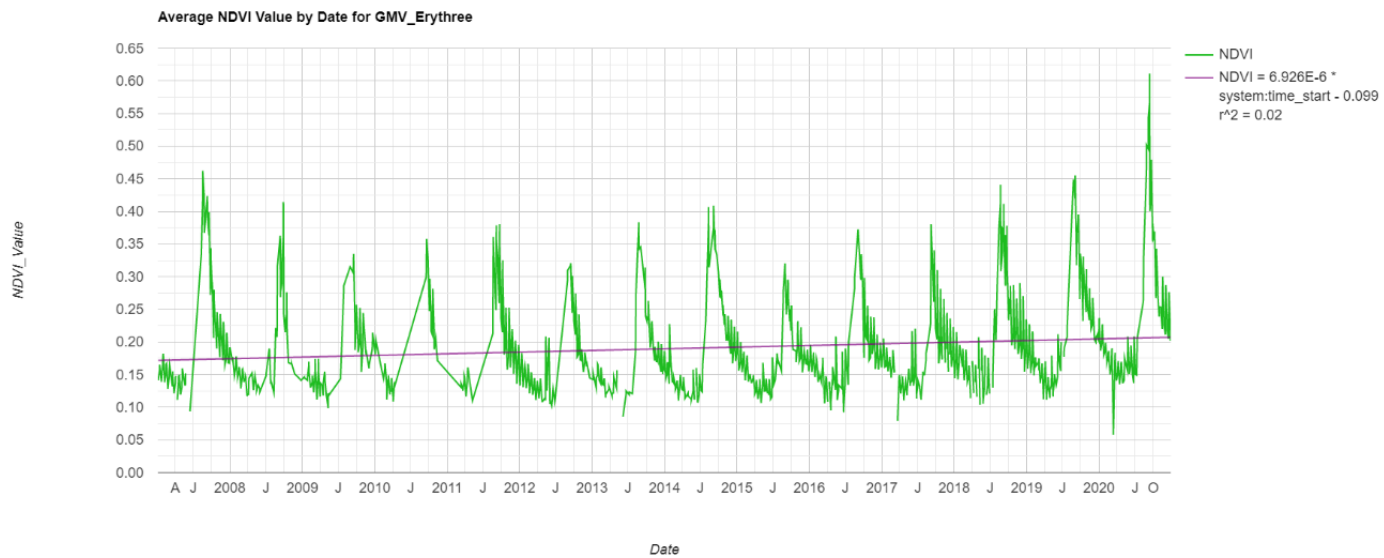


Figure 59 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV en Erythrée.

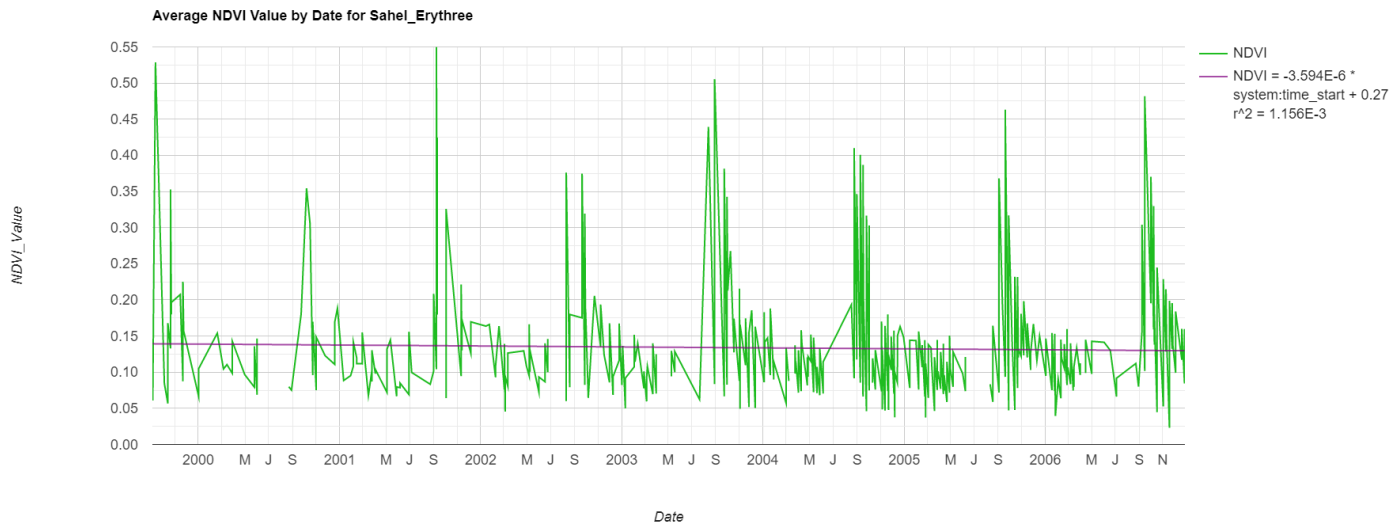


Figure 60 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour le Sahel en Erythrée.

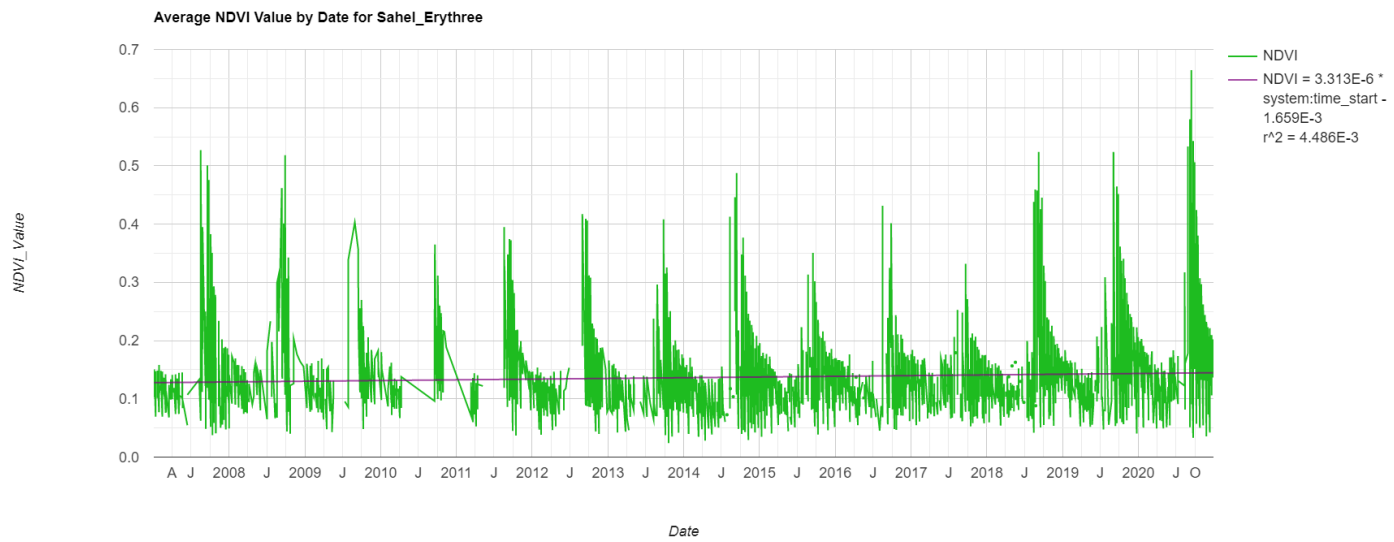


Figure 61 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour le Sahel en Erythrée.

7.3.10 Ethiopie

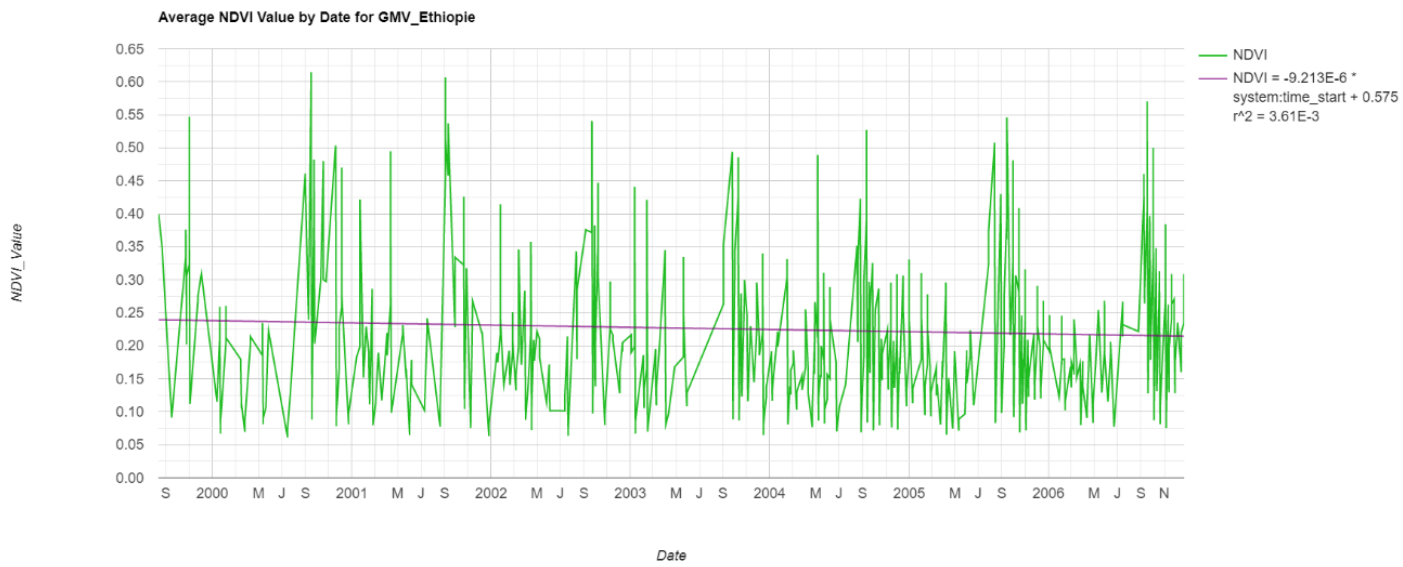


Figure 62 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV en Ethiopie.

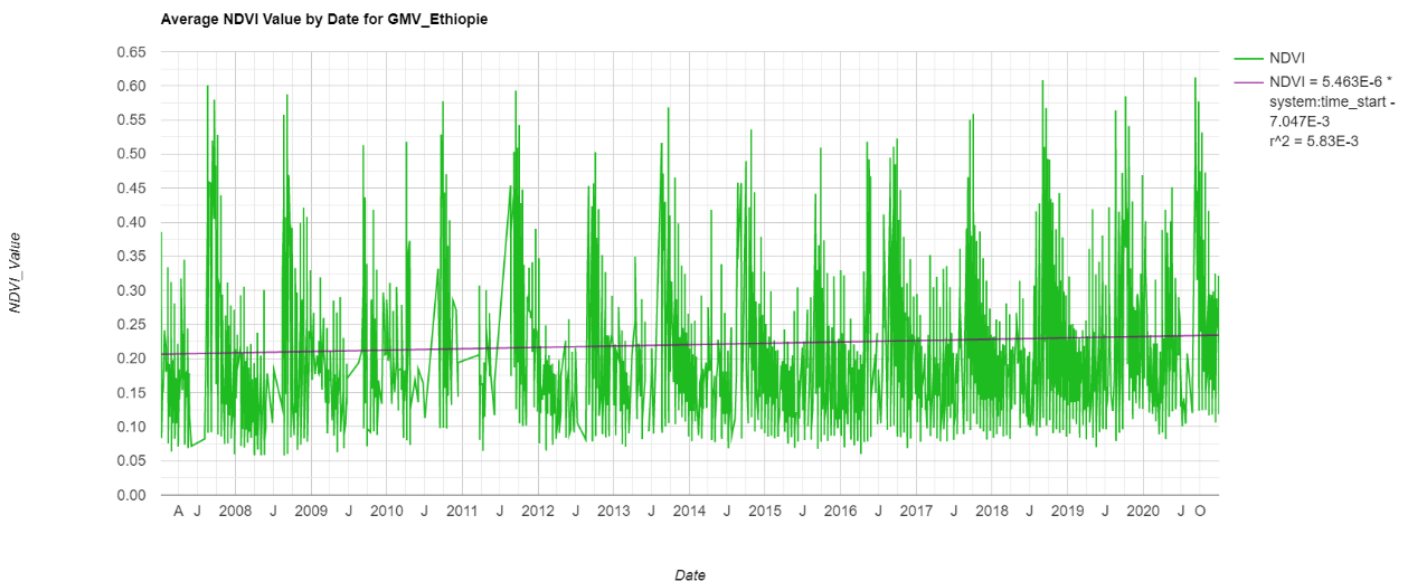


Figure 63 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV en Ethiopie.

7.3.11 Djibouti

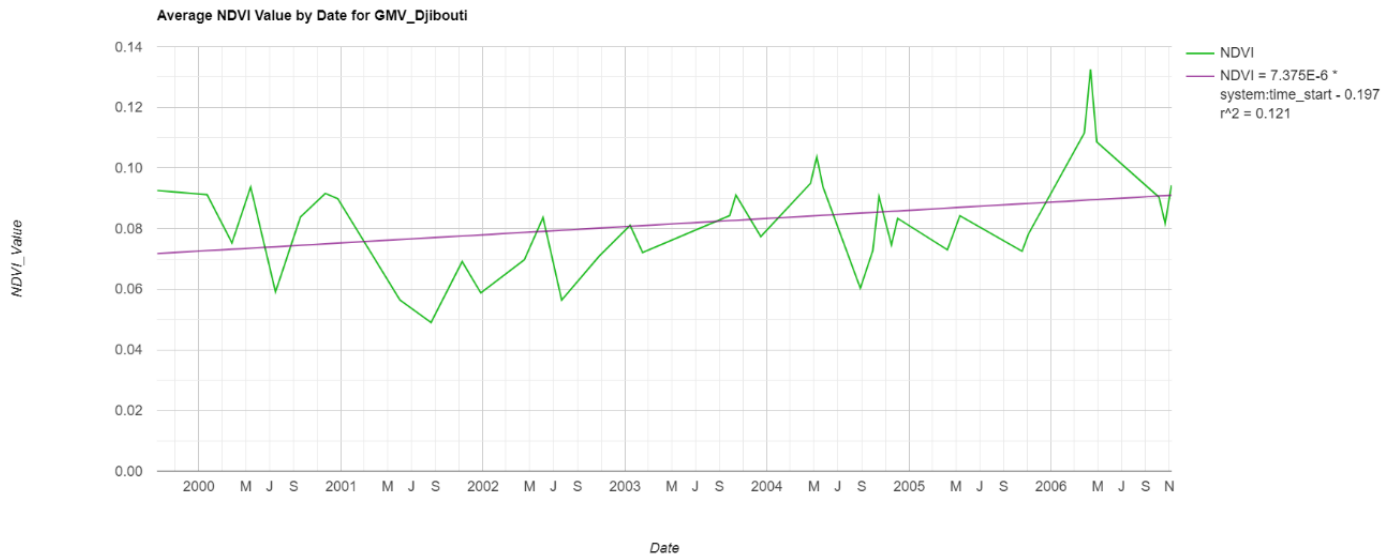


Figure 64 : Série temporelle pour la période 1999-2006 pour la GMV à Djibouti.

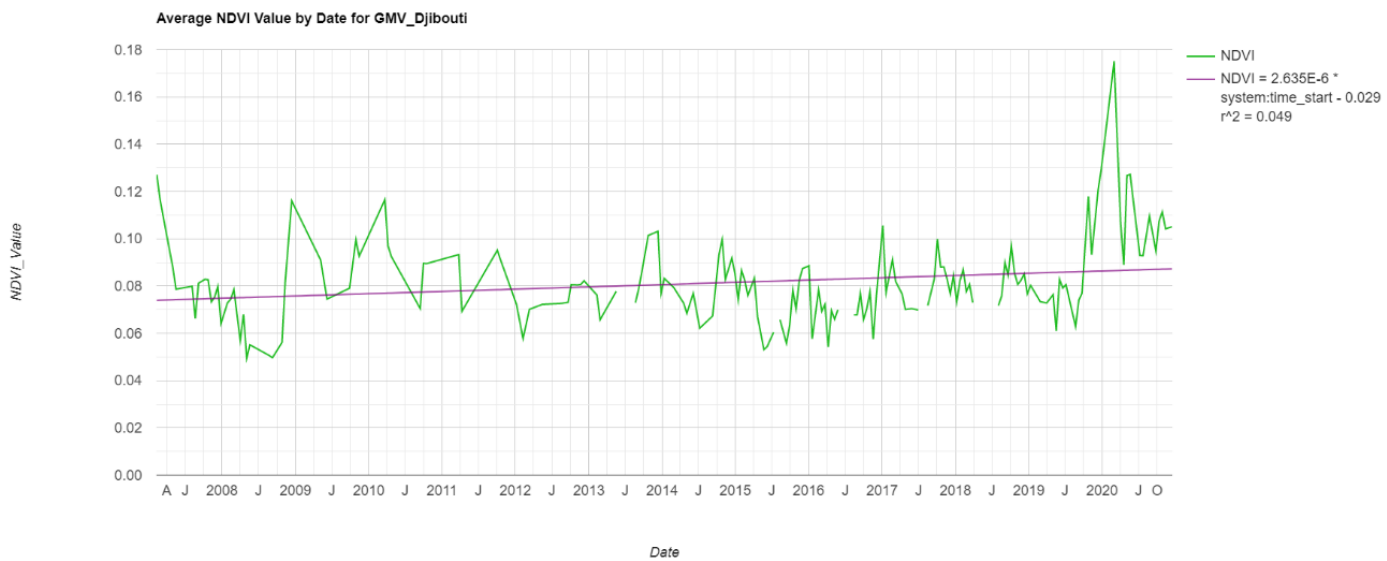


Figure 65 : Série temporelle pour la période 2007-2020 pour la GMV à Djibouti.

7.4 Tableaux des p-values des séries temporelles

Pays	GMV 1999-2006	GMV 2007-2020	Sahel 1999-2006	Sahel 2007-2020
Sénégal	0.2656	0.2564	0.8318	0.0226
Mauritanie	0.7265	0.1146	0.0273	0.0058
Mali	0.3891	0.0015	0.9143	0.0017
Burkina Faso	0.3752	0.0059	0.6275	0.0021
Niger	0.5386	3.516x10⁻¹³	0.0018	8.51x10⁻¹²
Nigeria	0.1233	9.288x10⁻⁹	0.0423	1.105x10⁻¹³
Cameroun	0.035	6.168x10⁻⁸	0.0781	1.283x10⁻⁷
Tchad	0.2029	2.877x10⁻⁵	0.0472	8.219x10⁻⁹
Soudan	0.0404	2.2x10⁻¹⁶	0.0047	4.945x10⁻¹³
Erythrée	0.4589	7.174x10⁻⁷	0.4624	0.0053
Ethiopie	0.1441	0.0005	/	/
Djibouti	0.0310	0.0044	/	/

Tableau 6 : tableau regroupant les p-values des modèles linéaires des séries temporelles. En vert, les scores pour la GMV par pays (séries temporelles 1999-2006 et 2007-2020) et en jaune, les scores pour le Sahel par pays (séries temporelles 1999-2006 et 2007-2020). Les valeurs en gras sont les p-values significatives au seuil 0.05.

7.5 Diagrammes quantile-quantile

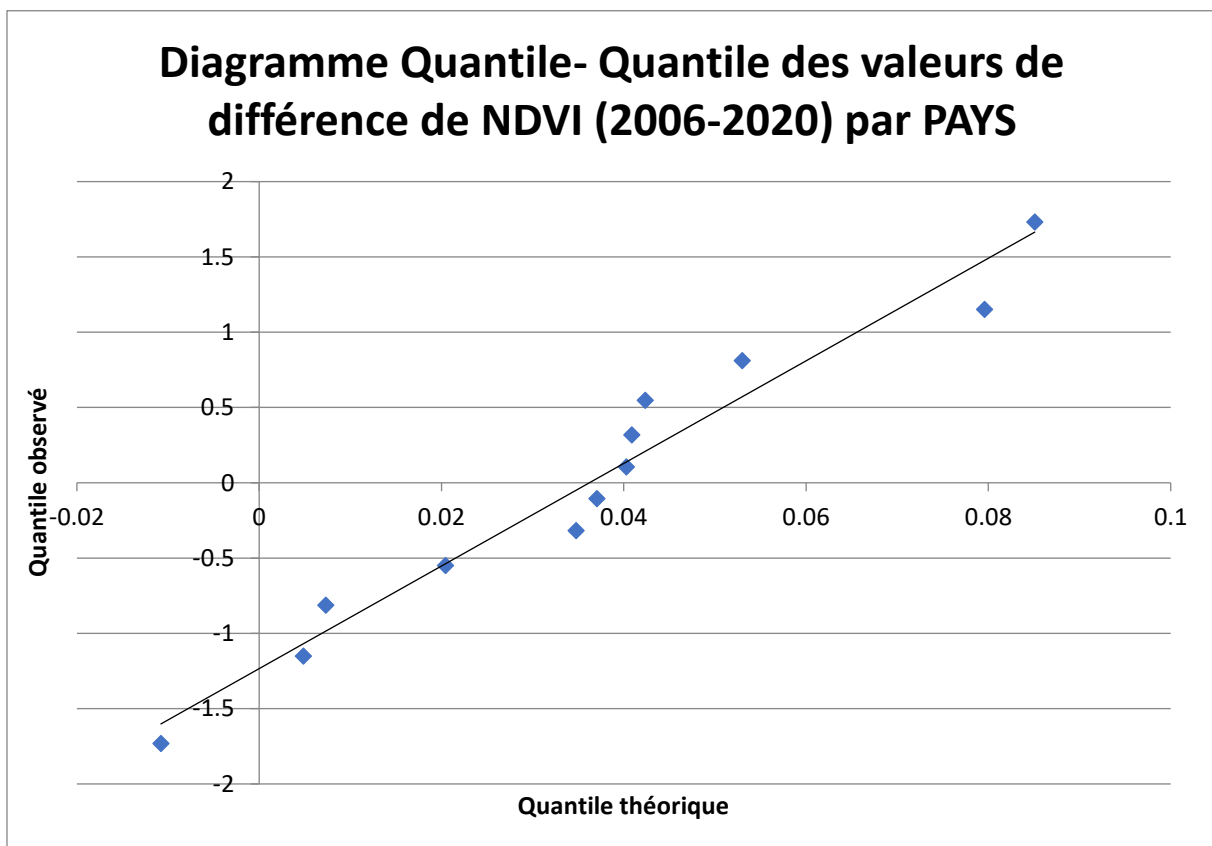


Figure 66 : Diagramme Quantile-Quantile des valeurs de différence entre l'année 2006 et 2020 par pays.

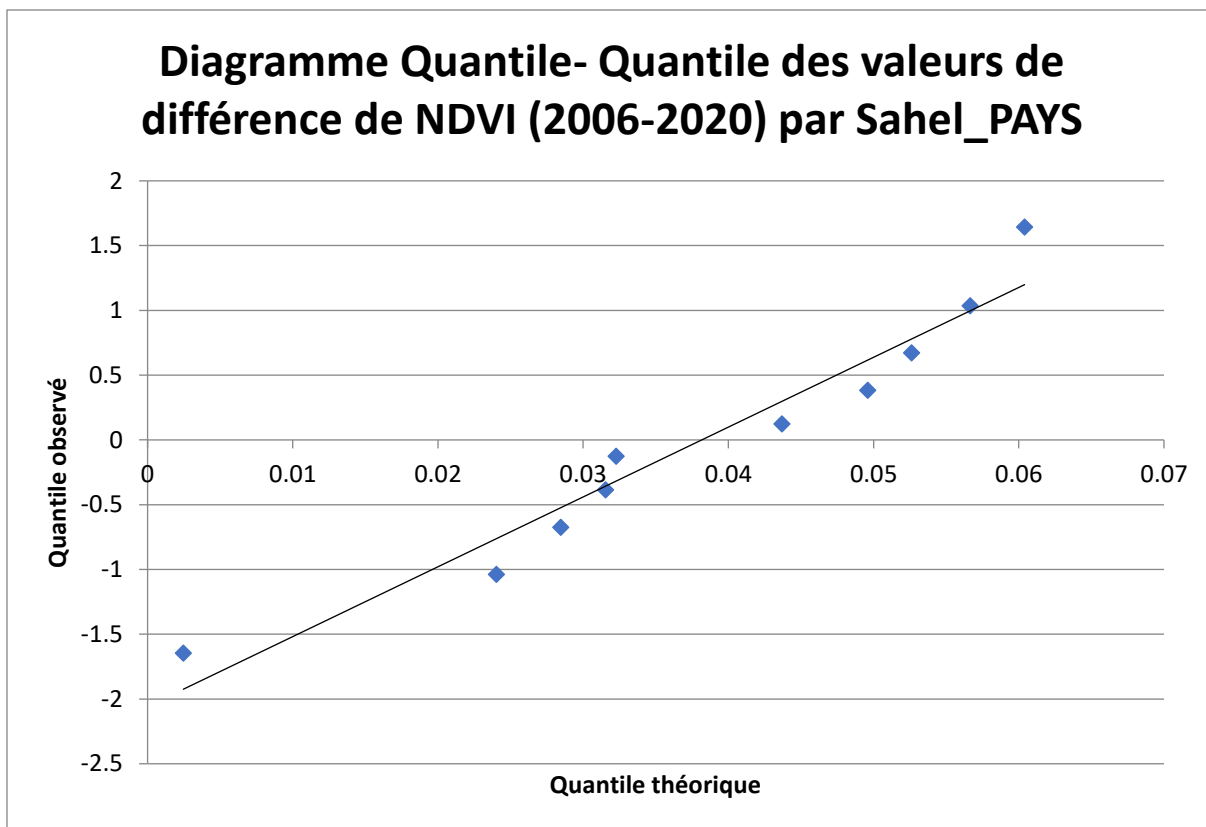


Figure 67 : Diagramme Quantile-Quantile des valeurs de différence entre l'année 2006 et 2020 par region du Sahel par pays.

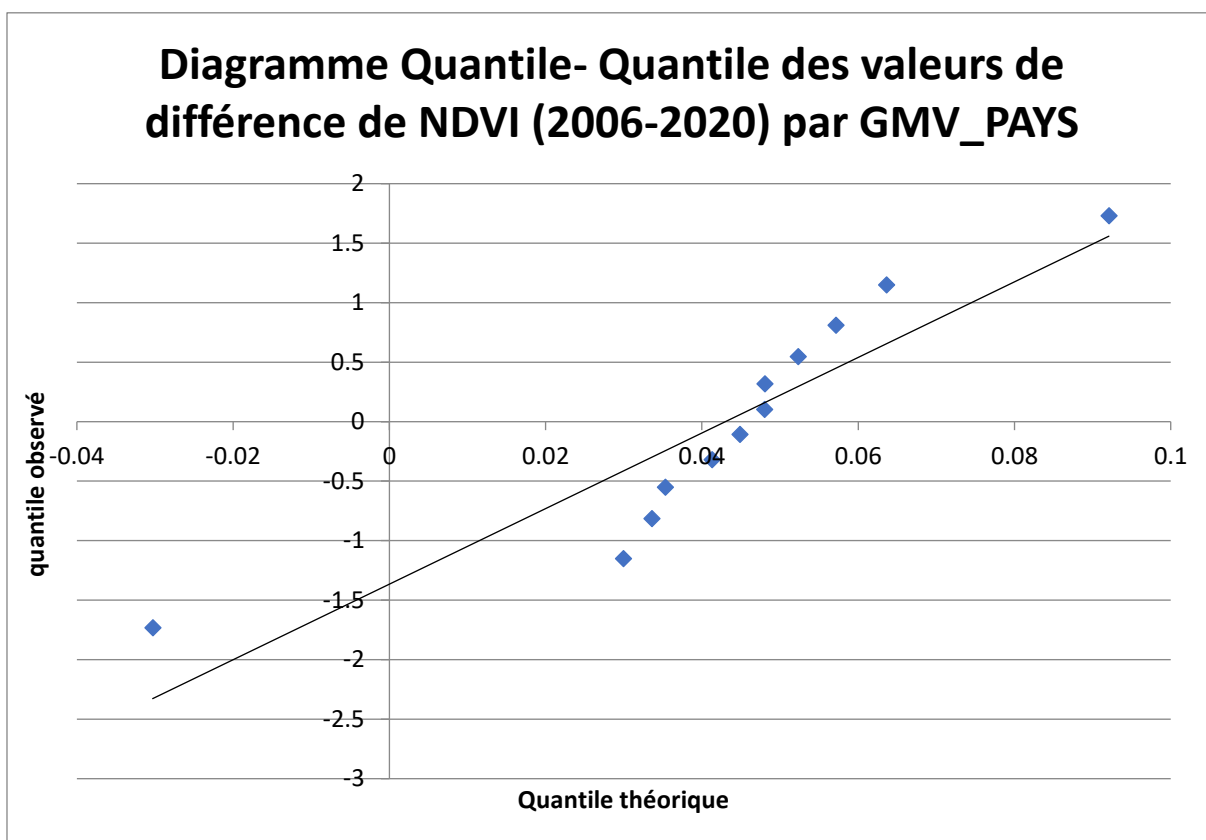


Figure 68 : Diagramme Quantile-Quantile des valeurs de différence entre l'année 2006 et 2020 par region de la GMV par pays.

7.6 Code GEE

```
// Region Of Interest
```

```
var ROI = GMV_line.buffer(10000);
```

```
//chaque pays
```

```
var Senegal = Countries.filterMetadata("country_co","equals","SG");  
var Mauritanie = Countries.filterMetadata("country_co","equals","MR");  
var Mali = Countries.filterMetadata("country_co","equals","ML");  
var BF = Countries.filterMetadata("country_co","equals","UV");  
var Niger = Countries.filterMetadata("country_co","equals","NG");  
var Nigeria = Countries.filterMetadata("country_co","equals","NI");  
var Cameroun = Countries.filterMetadata("country_co","equals","CM")  
var Tchad = Countries.filterMetadata("country_co","equals","CD");  
var Soudan = Countries.filterMetadata("country_co","equals","SU");  
var Erythree = Countries.filterMetadata("country_co","equals","ER");  
var Ethiopie = Countries.filterMetadata("country_co","equals","ET");  
var Djibouti = Countries.filterMetadata("country_co","equals","DJ");
```

```
// GMV_Pays
```

```
var GMV_Senegal = ROI.intersection({'right': Senegal, 'maxError': 1});  
var GMV_Mauritanie = ROI.intersection({'right': Mauritanie, 'maxError': 1});  
var GMV_Mali = ROI.intersection({'right': Mali, 'maxError': 1});  
var GMV_BF = ROI.intersection({'right': BF, 'maxError': 1});  
var GMV_Nigeria = ROI.intersection({'right': Nigeria, 'maxError': 1});  
var GMV_Niger = ROI.intersection({'right': Niger, 'maxError': 1});  
var GMV_Cameroun = ROI.intersection({'right': Cameroun, 'maxError': 1});  
var GMV_Tchad = ROI.intersection({'right': Tchad, 'maxError': 1});  
var GMV_Soudan = ROI.intersection({'right': Soudan, 'maxError': 1});  
var GMV_Erythree = ROI.intersection({'right': Erythree, 'maxError': 1});  
var GMV_Ethiopie = ROI.intersection({'right': Ethiopie, 'maxError': 1});  
var GMV_Djibouti = ROI.intersection({'right': Djibouti, 'maxError': 1});
```

```
// Sahel_Pays
```

```
var Sahel_Senegal = Sahel.intersection({'right': Senegal, 'maxError': 1});  
var Sahel_Mauritanie = Sahel.intersection({'right': Mauritanie, 'maxError': 1});  
var Sahel_Mali = Sahel.intersection({'right': Mali, 'maxError': 1});  
var Sahel_BF = Sahel.intersection({'right': BF, 'maxError': 1});  
var Sahel_Niger = Sahel.intersection({'right': Niger, 'maxError': 1});  
var Sahel_Nigeria = Sahel.intersection({'right': Nigeria, 'maxError': 1});  
var Sahel_Cameroun = Sahel.intersection({'right': Cameroun, 'maxError': 1});  
var Sahel_Tchad = Sahel.intersection({'right': Tchad, 'maxError': 1});  
var Sahel_Soudan = Sahel.intersection({'right': Soudan, 'maxError': 1});  
var Sahel_Erythree = Sahel.intersection({'right': Erythree, 'maxError': 1});  
var Sahel_Ethiopie = Sahel.intersection({'right': Ethiopie, 'maxError': 1});  
var Sahel_Djibouti = Sahel.intersection({'right': Djibouti, 'maxError': 1});
```

```
// the image collection filter with ROI, date and cloud cover
```

```
var I7collection =
```

```
ee.ImageCollection("LANDSAT/LE07/C01/T1_SR").filterBounds(ROI).filterDate('2007-01-01', '2020-12-31').filterMetadata("CLOUD_COVER", "less_than", 30);
```

```
// Function for add a NDVI band for each image of the collection
```

```
var getNDVI = function(img){  
return img.addBands(img.normalizedDifference(['B4','B3']).rename('NDVI'));
```

```
var getNDVII8 = function (img){  
return img.addBands(img.normalizedDifference(["B5","B4"]).rename("NDVI"));
```

```
// CLOUD MASK
```

```
var cloudMask = function(image) {  
var qa = image.select('pixel_qa');  
var cloud = qa.bitwiseAnd(1 << 5).and(qa.bitwiseAnd(11 << 6)) .or(qa.bitwiseAnd(1 << 3));  
var mask2 = image.mask().reduce(ee.Reducer.min());  
return image.updateMask(cloud.not()).updateMask(mask2);  
};
```

```
// One image for each year with the mean for each pixel and for each band
```

```
var GMV2007 = l7collection.filterDate("2007-1-1","2007-12-31").map(cloudMask).map(getNDVI).mean().clip(ROI);
```

```
VarGMV2008=l7collection.filterDate("2008-1-1","2008-12-31").map(cloudMask).map(getNDVI).mean().clip(ROI);
```

```
var GMV2009=l7collection.filterDate("2009-1-1","2009-12-31").map(cloudMask).map(getNDVI).mean().clip(ROI);
```

```
var GMV2010=l7collection.filterDate("2010-1-1","2010-12-31").map(cloudMask).map(getNDVI).mean().clip(ROI);
```

```
var GMV2011=l7collection.filterDate("2011-1-1","2011-12-31").map(cloudMask).map(getNDVI).mean().clip(ROI);
```

```
var GMV2012=l7collection.filterDate("2012-1-1","2012-12-31").map(cloudMask).map(getNDVI).mean().clip(ROI);
```

```
var GMV2013=l7collection.filterDate("2013-1-1","2013-12-31").map(cloudMask).map(getNDVI).mean().clip(ROI);
```

```
var GMV2014=l7collection.filterDate("2014-1-1","2014-12-31").map(cloudMask).map(getNDVI).mean().clip(ROI);
```

```
var GMV2015=l7collection.filterDate("2015-1-1","2015-12-31").map(cloudMask).map(getNDVI).mean().clip(ROI);
```

```
var GMV2016=l7collection.filterDate("2016-1-1","2016-12-31").map(cloudMask).map(getNDVI).mean().clip(ROI);
```

```
var GMV2017=l7collection.filterDate("2017-1-1","2017-12-31").map(cloudMask).map(getNDVI).mean().clip(ROI);
```

```

var GMV2018=l7collection.filterDate("2018-1-1","2018-12-31").map(cloudMask).map(getNDVI).mean().clip(ROI);

var GMV2019=l7collection.filterDate("2019-1-1","2019-12-31").map(cloudMask).map(getNDVI).mean().clip(ROI);

var GMV2020=l7collection.filterDate("2020-1-1","2020-12-31").map(cloudMask).map(getNDVI).mean().clip(ROI);

var GMVall = l7collection.map(cloudMask).map(getNDVI); // Not clipped here !!

```

//Only ndvi band for each year

```

var ndvi2007=GMV2007.select(["NDVI"])
var ndvi2008=GMV2008.select(["NDVI"])
var ndvi2009=GMV2009.select(["NDVI"])
var ndvi2010=GMV2010.select(["NDVI"])
var ndvi2011=GMV2011.select(["NDVI"])
var ndvi2012=GMV2012.select(["NDVI"])
var ndvi2013=GMV2013.select(["NDVI"])
var ndvi2014=GMV2014.select(["NDVI"])
var ndvi2015=GMV2015.select(["NDVI"])
var ndvi2016=GMV2016.select(["NDVI"])
var ndvi2017=GMV2017.select(["NDVI"])
var ndvi2018=GMV2018.select(["NDVI"])
var ndvi2019=GMV2019.select(["NDVI"])
var ndvi2020=GMV2020.select(["NDVI"])
var ndviall= GMVall.select(["NDVI"]) // still not clipped !!

```

// Histogramme

```

var GMV2007Histogramme = ui.Chart.image.histogram(ndvi2007,ROI,300,20);

```

```

GMV2007Histogramme = GMV2007Histogramme.setOptions({title:"Histogramme du NDVI de la GMV 2007"}); // Change « ndvi2007 » by all the other ndviXXXX

```

// TimeSerie, change the name and the region for every country (Sahel AND GMV) + Change the collection for Sahel

```

var GMVTimeSerie_Senegal=ui.Chart.image.series({
  imageCollection: GMVall.select(["NDVI"]),
  region: GMV_Senegal,
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  scale:300,
  xProperty:'system:time_start',
})
.setChartType('LineChart')
.setOptions({
  title: 'Average NDVI Value by Date for GMV_Senegal',
  hAxis: {title: 'Date'},

```

```

vAxis: {title: "NDVI_Value"},
lineWidth: 2,
colors: ["1ebc20"],
trendlines: {
  0: {
    type: 'linear',
    color: 'purple',
    lineWidth: 2,
    opacity: 0.7,
    visibleInLegend: true,
    showR2: true}}
});

```

// TimeSerie for the year 1999-2006, change the name and the region for every country (Sahel AND GMV) + Change the collection for Sahel

// the image collection filter with ROI, date and cloud cover

```

var l7collection9906 =
ee.ImageCollection("LANDSAT/LE07/C01/T1_SR").filterBounds(ROI).filterDate('1999-01-01', '2006-12-31').filterMetadata("CLOUD_COVER", "less_than", 30);

var GMVall_9206 = l7collection9906.map(cloudMask).map(getNDVI);

var GMVTimeSerie9906=ui.Chart.image.series({
  imageCollection: GMVall_9206.select(["NDVI"]),
  region: GMV_Senegal,
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  scale:300,
  xProperty:'system:time_start',

  })
  .setChartType('LineChart')
  .setOptions({
title: 'Average NDVI Value by Date for GMV_Senegal',
hAxis: {title: 'Date'},
vAxis: {title: "NDVI_Value"},
lineWidth: 2,
colors: ["1ebc20"],
trendlines: {
  0: {
    type: 'linear',
    color: 'purple',
    lineWidth: 2,
    opacity: 0.7,
    visibleInLegend: true,
    showR2: true,}}
});

```

```

// Data for Countries and for Sahel_Country Données par pays et pour la région du Sahel par pays
// we want data for 2006 et 2020 for each country

var l7Collection2006=ee.ImageCollection("LANDSAT/LE07/C01/T1_SR").filterDate("2006-01-01","2006-12-31").filterMetadata("CLOUD_COVER","less_than",30);

var l8Collection=ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C01/T1_SR").filterDate("2020-01-01","2020-12-31").filterMetadata("CLOUD_COVER","less_than",30);

// Map by country / sahel_Country for 2006 et 2020
//Exemple for Senegal, change the name of var + bounds for each country

var Senegal2006
=l7Collection2006.filterBounds(Senegal).map(cloudMask).map(getNDVI).select(["NDVI"]).mean().clip(Senegal);
var Senegal2020l8 =
l8Collection.filterBounds(Senegal).map(cloudMask).map(getNDVI).select(["NDVI"]).mean().clip(Senegal);
var DiffSenegal0620 = Senegal2020l8.subtract(Senegal2006);
var Sahel_Senegal2006=Senegal2006.select(["NDVI"]).clip(Sahel);
var Sahel_Senegal2020=Senegal2020l8.select(["NDVI"]).clip(Sahel);
var GMV_Senegal2006 = Senegal2006.select(["NDVI"]).clip(GMV_Senegal);
var GMV_Senegal2020l8 = Senegal2020l8.select(["NDVI"]).clip(GMV_Senegal);

Export.image.toDrive({
  image:DiffSenegal0620,
  description:"DiffSenegal0620",
  scale: 300,
  region: Senegal});

// mean annual value by country for NDVI

var meanSenegal2006 = Senegal2006.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  geometry: Senegal.geometry(),
  scale: 300,
  maxPixels: 1e11
});

var meanSenegal2020 = Senegal2020l8.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  geometry: Senegal.geometry(),
  scale: 300,
  maxPixels: 1e11
});

```

```
// mean annual value by Sahel_country for NDVI, no need to specify the geometry, Sahel_Country is already clipped on the right form
```

```
var meanSahel_Senegal2006 = Sahel_Senegal2006.reduceRegion({  
  reducer: ee.Reducer.mean(),  
  //geometry: Sahel_Senegal.geometry(),  
  scale: 300,  
  maxPixels: 1e11  
});
```

```
var meanSahel_Senegal2020 = Sahel_Senegal2020.reduceRegion({  
  reducer: ee.Reducer.mean(),  
  //geometry: Sahel_Senegal.geometry(),  
  scale: 300,  
  maxPixels: 1e11  
});
```

```
// mean annual value by GMV_country for NDVI, no need to specify the geometry, GMV_Country is already clipped on the right form
```

```
var meanGMV_Senegal2006 = GMV_Djibouti2006.reduceRegion({  
  reducer: ee.Reducer.mean(),  
  //geometry: GMV_Senegal.geometry(),  
  scale: 300,  
  maxPixels: 1e11  
});
```

```
var meanGMV_Senegal2020 = GMV_Djibouti2020l8.reduceRegion({  
  reducer: ee.Reducer.mean(),  
  //geometry: GMV_Senegal.geometry(),  
  scale: 300,  
  maxPixels: 1e11  
});
```