

La télédétection, témoin de la sècheresse forestière dans la région de Tonkpi

Remote sensing, witness of forest drought in the Tonkpi region

***KANGA Kouakou Hermann M.**

Laboratoire d'Analyse des Vulnérabilités socio-environnementales
(LAVSE)

Université Alassane OUATTARA (RCI) ¹

TRA BI Zamblé Armand¹,

E-mail : zambtra@yahoo.fr

CISSE Kané Vassouleymane¹

; kanevasouleymane@gmail.com

*Correspondant principal : KANGA Kouakou Hermann M. ;

E-mail : rmankanga@gmail.com



DOI : [10.5281/zenodo.8256059](https://doi.org/10.5281/zenodo.8256059)

Résumé

L'Ouest de la Côte d'Ivoire où règne un topo-climat, est avec la partie Sud, les zones du pays ayant les pluviométries les plus abondantes, comparativement au Centre et au Nord. Cependant le contexte climatique est marqué par la variabilité climatique. Plusieurs études ont indiqué que la Côte d'Ivoire tout comme les pays de l'Afrique de l'ouest tropicale, connaissent des périodes de sécheresses depuis désormais plusieurs décennies. La région de Tonkpi n'est pas épargnée et connaît donc une

alternance de périodes humides et sèches. Dans ce contexte climatique de plus en plus perturbé, le patrimoine forestier est aussi en dégradation et plusieurs facteurs sont mis en cause. Cependant, le facteur climatique dont les effets sur la forêt sont plus subtils et sournois, mérite d'être aussi étudié.

Ainsi, cette étude se propose d'analyser par le biais de la télédétection, le comportement de ce patrimoine forestier au rythme du climat. Dans cette perspective, les données de précipitations de cette zone montagneuse sur la période 1980 – 2018, ont été utilisées pour l'analyse climatique. Mais aussi l'imagerie satellitaire NDVI de MODIS pour mieux percevoir d'éventuels risques de sécheresse forestière à partir du rythme saisonnier de la végétation.

L'analyse climatique révèle que la série 1980-2018 contient 21 années sèches et 18 années humides. Les années 2006 et 2007 ont connu des sécheresses de types extrêmement sévères. La sécheresse s'installe donc progressivement dans cette zone de climat tropical humide. Quant à l'étude du rythme saisonnier de la végétation de 2000 à 2020, elle révèle qu'au cours de la grande saison sèche de décembre à février, la diminution progressive de la biomasse entraîne une régression des surfaces à forte activité photosynthétique. En conséquence, les surfaces à faible indice de végétation augmentent. Pendant la saison pluvieuse, c'est le phénomène contraire. Les surfaces à forte activité photosynthétique augmentent au détriment de celles à faible indice de végétation. Cette tendance à l'augmentation est interrompue dans sa progression et même inversée par la petite saison sèche d'octobre à novembre.

Mots clés : Télédétection, NDVI, Précipitations, Sécheresse forestière, Tonkpi

Abstract

The western part of Côte d'Ivoire where a topo-climate reigns, is with the southern part, the areas of the country having the most abundant rainfall, compared to the Centre and the North. However the climate context is marked by climate variability. Several studies have indicated that Côte d'Ivoire, like the countries of tropical West Africa, have been experiencing periods of drought for several decades now. The region of Tonkpi is not spared and therefore has alternating wet and dry periods. In this increasingly disturbed climate, the forest heritage is also in

degradation and several factors are being questioned. However, the climate factor whose effects on the forest are more subtle is worth studying.

Thus, this study aims to analyse, through remote sensing, the behaviour of this forest heritage at the rhythm of the climate. With this in mind, precipitation data from this mountainous area over the period 1980-2018 were used for climate analysis. But also the MODIS NDVI satellite imagery to better perceive possible risks of forest drought from the seasonal rhythm of the vegetation.

Climate analysis reveals that the 1980-2018 series contains 21 dry and 18 wet years. The years 2006 and 2007 saw extremely severe droughts. The drought is gradually settling in this zone of humid tropical climate. As for the study of the seasonal rhythm of vegetation from 2000 to 2020, it reveals that during the great dry season from December to February, the gradual decrease in biomass leads to a regression of surfaces with high photosynthetic activity. As a result, areas with a low vegetation index increase. During the rainy season, the opposite is true. Areas with high photosynthetic activity increase at the expense of those with low vegetation index. This upward trend is interrupted in its progression and even reversed by the small dry season from October to November.

Keywords : Remote sensing, NDVI, Rainfall, Forest drought, Tonkpi

Introduction

La sécheresse est un phénomène naturel qui pose de nombreux problèmes à travers le monde, dans la mesure où elle provoque des ponctions énormes sur les ressources naturelles, particulièrement sur les ressources forestières (C. FAYE *et al.*, 2017, p.12). Au sens strict, les sécheresses sont associées aux intervalles sans précipitations et suffisamment longues pour que le déficit hydrique soit ressenti par les systèmes naturels ou humains (I.C. STANGA, 2009). De même, elles peuvent être liées à l'insuffisance des précipitations, à la forte évapotranspiration et la surexploitation de ressources en eau ou même à la combinaison de tous ces facteurs. De façon générale, la sécheresse représente la période et l'état de déficit hydrique causés par la différence négative entre les entrées et les sorties d'eau dans le système, provoquant ainsi des déséquilibres et des dysfonctionnements de caractère réversible ou irréversible (I.C. STANGA, 2009, p.32).

Par ailleurs, depuis plus de 30 ans, on assiste à une persistance de la sécheresse en Afrique soudano-sahélienne, mieux cette sécheresse s'étend

de plus en plus vers les pays (humides) situés plus au Sud (E. SERVAT et al., 1998, p.327 ; J.E. PATUREL et al., 1998, p.939).

Les travaux de l'ORSTOM à l'échelle de la Côte d'Ivoire dans le cadre du programme ICCARE (Identification et Conséquence d'une variabilité Climatique en Afrique de l'Ouest non sahélienne), soulignent une baisse persistante de la pluviométrie qui serait manifestée aux alentours des années 1970 (E. SERVAT et al., 1999, p.366). Les précipitations annuelles auraient diminuées en moyenne de 0,5 % par an entre 1965 et 1980 (Y. T. BROU et J. L. CHALEARD, 2007, p.68). Des études ont révélé que même les régions dites humides de la Côte d'Ivoire connaissent des périodes de sécheresses depuis désormais plusieurs décennies (N.E. WANDAN et al., 2017, p.321).

Ainsi, dans la région de Tonkpi, la pluviométrie a un caractère particulier dû au topoclimat qui y règne. Cependant cette zone semi-montagneuse qui se présente comme l'une des plus pluvieuses du pays, ne semble pas être épargnée par cette variabilité climatique généralisée. Pourtant, combinées aux pressions anthropiques défavorables, ces modifications dans le régime pluviométrique marquées par les séquences sèches, peuvent rendre vulnérable le couvert forestier qui est donc exposé au risque de sécheresse forestière. Ainsi, Cette étude a pour objectif de démontrer à l'aide de l'imagerie satellitaire, la présence d'éventuelle sécheresse forestière dans la région de Tonkpi. Cela permettra de mieux comprendre l'évolution saisonnière de la forêt, tout en appréhendant le rôle que peut jouer la sécheresse météorologique dans le mécanisme de stress hydrique de la forêt.

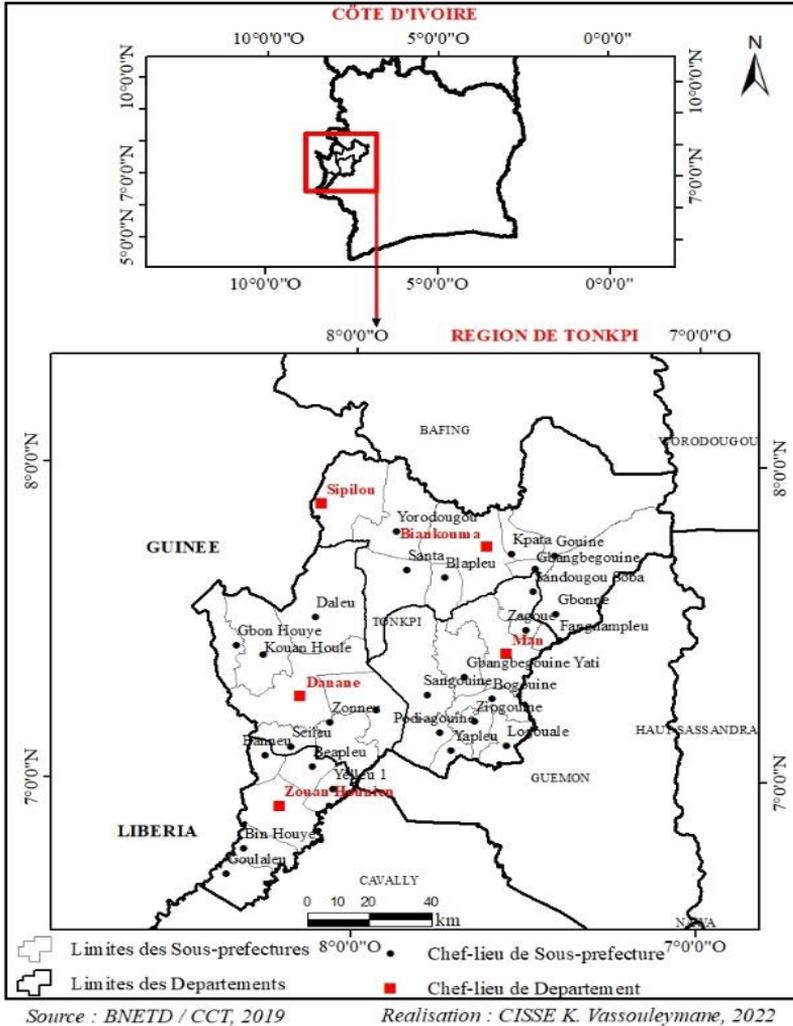
1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est située à l'extrême Ouest de la Côte d'Ivoire (carte 1). Elle est incluse dans le district des montagnes avec les régions de Cavally et de Guémon. Les massifs montagneux sont les traits caractéristiques de ce territoire. En effet, le relief est constitué de hauts plateaux (600 mètres) et de montagnes (+ 1 000 mètres d'altitudes). Cette région abrite un climat particulier de type montagnard ou un topo-climat, marqué par des montagnes et des hauts-plateaux, comprenant des zones très accidentées aux contours variant avec des pentes et des altitudes moyennes dépassant les 1 000 mètres (J.Z. KELI, 2017, p. 3). Les hauteurs de pluie se situent entre 1 200 et 2 400 millimètres par an. Les températures sont douces et se fixent en moyenne à 24 °C. L'hygrométrie oscille entre 80 et 85 % (N.E. WANDAN et al., 2017, p. 313). La végétation est dominée

par la forêt dense. Ces conditions biophysiques rendent cette zone favorable à l'agriculture. Comme dans la plupart des régions du pays, l'économie locale est basée sur l'agriculture avec une production végétale et animale relativement diversifiée. La région réalise diverses cultures d'exportations en particulier le café, le cacao, l'hévéa et le palmier à huile, mais aussi de nombreuses cultures vivrières dont le riz, le manioc, le plantain et le maïs. Le potentiel agricole demeure important dans des écologies diversifiées comprenant des zones montagneuses, des plaines, des plateaux et des bas-fonds. Celles-ci offrent des possibilités culturelles variées.

À l'image de la Côte d'Ivoire, la région de Tonkpi est bien drainée. Selon les travaux de J. BIEMI *et al.* (1997, p.5) sur les relations entre les accidents géologiques et le réseau hydrographique, les principaux cours d'eau circulent essentiellement dans les axes tectoniques. En effet, deux des quatre bassins principaux que compte la Côte d'Ivoire irriguent cette région. Elle est traversée par les fleuves Sassandra à l'Est et Cavally à l'Ouest avec de nombreux affluents, ce qui favorisent une végétation constituée à 80% de forêt humide (N.E. WANDAN *et al.*, 2017, p. 312).

La zone Ouest de la Côte d'Ivoire se présente comme une zone charnière regroupant les trois grands domaines biogéographiques du pays à savoir, la zone Soudanienne du Nord, la zone de transition du Centre et la zone Guinéenne du Sud. La végétation de la région de Tonkpi est ainsi constituée en grande partie de forêt dense. Cette végétation forestière cède progressivement la place dans les parties Sud et Centre-ouest à des jachères à *Chromolaena odorata* (appelé communément Sékou Touré) et à des plantations agroindustrielles et de « savane boisée » au nord. (J. Z. KELI, 2017, p. 6).



Carte 1 : Situation géographique de la région de Tonkpi (Ouest de la Côte d'Ivoire)

2. Approche méthodologique

2.1. Données

2.1.1. Les données de précipitations

Les données utilisées pour cette étude sont constituées des données pluviométriques provenant des stations qui couvrent la zone d'étude sur la période d'étude 1980 - 2018. Ces données sont recueillies auprès de la Société d'Exploitation Aéroportuaire et Maritime (SODEXAM) section Météorologie. Pour étudier l'évolution du climat dans la région de Tonkpi,

on a recours aux analyses statistiques. De ce fait, les données de précipitations sont utilisées comme variables statistiques quantitatives.

2.1.2. *Les données satellitaires*

Des données d'indices de végétations mensuelles provenant du capteur MODIS Terra ont été utilisées pour évaluer l'état ou la phénologie de la végétation. Ces produits MODIS fournissent des données sur l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI). Des images NDVI de MODIS couvrant la période 2000 – 2020 ont été utilisées. Les images MODIS ont une résolution spatiale de 250 mètres. Chaque pixel correspond donc à une surface de 250 x 250 mètres, soit 6,25 hectares. La résolution spatiale de MODIS au nadir (pointage juste en-dessous du satellite) est de 250 mètres, mais en périphérie, elle peut être de plus de 500 mètres à l'intérieur même du pixel de 250 x 250 mètres. Il s'agit précisément des images NDVI de 250 mètres de résolution spatiale et de seize (16) jours de résolution temporelle. Ainsi les images MODIS étant des images récentes, celles utilisées dans cette étude partent de 2000 à 2020 pour le mois de janvier de ces différentes années. On a donc deux (2) images de janvier (1^{er} janvier et 17 janvier) pour la saison sèche et de 1^{er} Aout et 17 Aout pour la saison pluvieuse.

2.2. *Traitement des données*

2.2.1. *Méthode d'étude de la variabilité climatique*

- **Indice standardisé des précipitations (T.B McKee et al., 1993, p.180)**

$$SPI = \frac{(P_i - P_m)}{S} \tag{1}$$

P_i : Pluie de l'année i ;

P_m : Pluie moyenne de la série sur l'échelle temporelle considérée ;

S : Ecart-type de la série sur l'échelle temporelle considérée.

La classification de la sécheresse suivant les valeurs du SPI est présentée dans le tableau 1 :

Tableau I : Classification des séquences de sécheresse selon l'ISP

Valeurs de l'ISP	Séquences de sécheresses	Valeurs de l'ISP	Séquences humides
------------------	--------------------------	------------------	-------------------

0,00 < ISP < - 0,99	Légèrement sèche	0,00 < ISP < 0,99	Légèrement humide
-1,00 < ISP < - 1,49	Modérément sèche	1,00 < ISP < 1,49	Modérément humide
-1,50 < ISP < - 1,99	Sévèrement sèche	1,50 < ISP < 1,99	Sévèrement humide
ISP < -2,00	Extrêmement sèche	2,00 < ISP	Extrêmement humide

➤ **Paramètres descriptifs des séquences de sécheresses**

Dans les études de sécheresse, il est important de caractériser le début et la fin d'une sécheresse (durée), ainsi que son intensité et sa fréquence.

- **Fréquence des séquences de sécheresse** (T.B McKee et al., 1993, p.181)

La fréquence cumulée (F) de sécheresse donne une idée sur l'occurrence des séquences sèches sur une période d'étude. Elle est obtenue en faisant le rapport de l'effectif cumulé des séquences sèches par l'effectif total des années pluviométriques.

$$F = \frac{\text{Effectif cumulé des séquences sèches}}{\text{Effectif total des années pluvieuses}}$$

(2)

- **Durée maximale des séquences de sécheresse** (G. SORO et al., 2014, p.109).

La durée est l'une des caractéristiques importante de la sécheresse. En effet si une sécheresse débute rapidement sous certains régimes climatiques, il faut généralement au moins deux à trois mois avant de s'installer dans d'autres Régions. Elle peut ensuite persister pendant des mois voire des années. Le calcul de la durée se fait comme suit :

$$D = (A_{fin} - A_{début}) + 1 \tag{3}$$

A_{fin} : Année de la fin de la période sèche ;

$A_{début}$: Année du début de la période sèche ;

Pour cette étude, la durée maximale sera considérée comme paramètre caractéristique de la durée des séquences sèches.

- **Intensité des séquences de sécheresse**

L'intensité de la sécheresse peut être définit comme étant l'ampleur et la gravité des conséquences du déficit de précipitations. Elle peut être évaluée à l'aide des valeurs du SPI. Dans le cadre de cette étude, la valeur

extrême du SPI a été considérée comme valeur de référence de l'intensité de la sécheresse (G. SORO et al., 2014, p.111).

2.2.2. Traitement des images MODIS NDVI

La bande NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* ou *Indice de Végétation Normalisé*) de l'image satellitaire MODIS, a permis d'évaluer les données de la structure et de la physiologie de la couverture végétale telles que le recouvrement au sol et l'humidité. Le NDVI en appui aux différentes cartes de végétations fournies à partir de l'imagerie Landsat, permet de discriminer globalement quatre (4) types d'occupations du sol, caractérisés par différentes colorations. Celles-ci sont en rapport avec l'intensité de l'activité photosynthétique des peuplements. Ces données d'imageries satellitaires, confrontées à la vérité terrain, indiquent que les surfaces rehaussées en vert, sont les plus actives au niveau de la photosynthèse. Ainsi, les types de végétation à forte densité ligneuse comme les forêts denses humides et/ou parfois les forêts semis décidues. Par contre, les zones avec une densité ligneuse moins dense comme les forêts dégradées ou les savanes, ont une activité chlorophyllienne moins dense.

Le NDVI est un Indice de Végétation qui se définit comme la différence normalisée des mesures de réflectance spectrale acquises dans les zones de longueurs d'ondes « Proche Infra-Rouge » (« PIR ») et « Rouge » (R).

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

(3)

Avec : NDVI = Normalized Difference Vegetation

PIR = Bande du proche infrarouge

R = Bande du rouge

La valeur théorique du NDVI varie entre -1 et 1. En pratique, une surface d'eau libre (lac, fleuve...) prendra des valeurs de NDVI proches de 0, un sol nu prendra des valeurs de 0,1 à 0,2 alors qu'une végétation dense aura des valeurs de 0,5 à 0,8 (L. SAWADOGO, 2009, p.12). Les plantes vertes absorbent une grande partie des radiations solaires dans une zone longueurs d'onde appelée « PAR » (Photosynthetically Active radiation), dont fait partie la zone du « Rouge ». Par contre, le « PIR » est fortement diffusé (non absorbé : transmis et réfléchi) par la plante. Par conséquent, une plante vive apparaît sombre dans le PAR (dont le rouge) car ces longueurs d'ondes sont réfléchies en partie (grande valeur de réflectance).

Une végétation en bonne santé absorbe la plupart de la lumière visible qui l'intercepte et réfléchit une partie importante de la lumière PIR. Une végétation en mauvaise santé ou clairsemée réfléchit plus de lumière visible et moins de PIR.

2.2.3. Evaluation du stress hydrique de la végétation

- Indice de Végétation Transformé et Différencié (TDVI) (SANDHOLT et al., 2002))

C'est un indice développé dédié à l'étude de la végétation. Comme le NDVI, il prend en compte le « PIR » et le « Red » mais aussi un coefficient « 1.5 » développé mathématiquement. Sa formule est la suivante :

$$TDVI = 1.5 \times \frac{PIR-RED}{\sqrt{(PIR+RED-0.5)}} \quad (4)$$

Avec : TDVI = Transformed Difference Vegetation Index

PIR = Bande du proche infrarouge

RED = Bande du Rouge

Le TDVI est compris entre 0 et 1. Pour une même valeur de l'indice de végétation, les températures les plus élevées, correspondent aux surfaces les plus sèches. Cela permet donc d'estimer le taux d'humidité des sols et par conséquent l'état du stress hydrique des plantes.

3. Résultats

3.1. Caractérisation de la sécheresse météorologique dans la Région de Tonkpi

3.2.1. Evolution de la sécheresse météorologique

L'analyse des valeurs de SPI à court et à moyen terme montre qu'à partir de l'an 2000, peu de séquences sèches ont été observées, mais néanmoins cette période présente la séquence sèche la plus marquée (2005 – 2007) de la série (Figure 1). Ainsi de 1980 à 2018, quatre (4) séquences sèches ont été observées dans la région de Tonkpi. Il est à noter que sur ces 38 années de la série, vingt-une années ont connu un déficit pluviométrique. La séquence de sécheresse la plus longue de la série est de 1986 à 1993, soit sept (7) ans. Il y a également des séquences de deux (2) ans et des séquences entrecoupées par une année humide. Les deux premières décennies (1981 – 1990 et 1991 – 2000) semblent être les plus sèches de la série avec la plus longue séquence sèche. Mais il est à signaler que même si les

décennies 2000 semblent être les moins sèches, elle présente la séquence la plus sèche de la série. Aussi, les deux (2) dernières années 2017 et 2018 de notre série, ont été sèches. Ce qui témoigne du caractère très changeant de la pluviométrie. La région de Tonkpi fait alors face à la sécheresse qui apparaît régulièrement et qui s’installe au fil des années dans cette Région montagneuse dite « pluvieuse ».

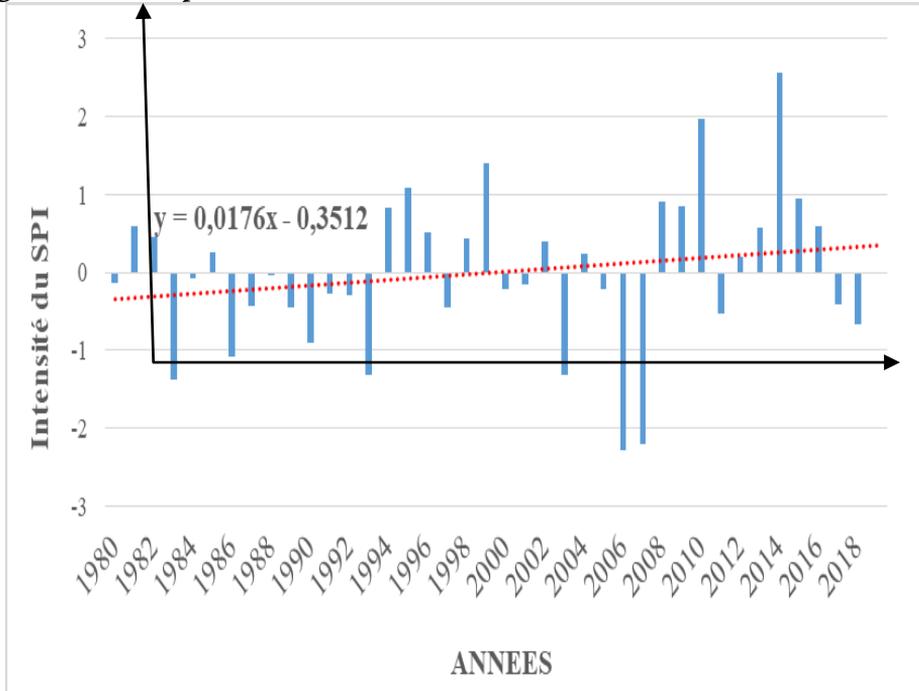


Figure 1 : Evolution de la sécheresse météorologique à l’aide du SPI

Le tableau 2 montre le résultat des calculs de l’indice standardisé de précipitations sur la série d’étude. L’analyse de cet indice sur 38 ans, montre deux (2) caractères d’années pluviométriques, réparties en 6 types dont 3 chacun. En effet, pour les années humides, on a les années légèrement humide, modérément humide et extrêmement humide. De même pour les années sèches, on a les années légèrement sèches, modérément sèches et extrêmement sèches.

De l’analyse séquentielle, il ressort qu’il y a une inégale répartition des caractères des années. La période d’avant la rupture 1980 – 1995 présente un bilan plus défavorable par rapport à la période d’après la rupture (1997 – 2018). Sur les 39 années d’études, on note vingt et une (21) années dites sèches soit 54% et 18 années humides soit 46%. En effet, la période d’avant la rupture est caractérisée de sèche avec 69% d’années sèches répartie

comme suit : 8 années légèrement sèches soit 50%, 3 années modérément sèches (19%), et aucune année sévèrement sèche. Pour les années humides, on a 4 années légèrement humides (25%) et une année modérément humide (6%), pour un total de 31%.

Par contre, la période d'après la rupture est caractérisée d'humide car il y a 32% d'années légèrement sèches, 5% d'années modérément sèches, mais surtout 9% d'années sévèrement sèche pour un total de 46% d'années sèches. Aussi on a 50% d'années légèrement humides, 5% d'années modérément humides et 9% d'années extrêmement humides, pour un total de 64% d'années humides.

Tableau II : Bilan des séquences climatiques

Nature	Avant rupture (1980 - 1995)	Après rupture (1997 - 2018)
Légèrement sèche	50%	32%
Modérément sèche	19%	5%
Extrêmement sèche	0%	9%
Total	69%	46%
Légèrement humide	25%	50%
Modérément humide	6%	5%
Extrêmement humide	0%	9%
Total	31%	64%
Différence	-38%	+18%

Au niveau de l'analyse des séquences climatiques, il y a une variation des années climatiques. La période avant la rupture est plus sèche (69% d'années sèches) par rapport à la période d'après la rupture pluviométrique (46% d'années sèches), soit un déficit de -38%. La période d'après la rupture est relativement plus humide avec 64% d'années humides contre 46% pour les années humides avant la rupture, soit un excès de +18%. Cependant, bien que la période 1997 - 2018 soit relativement humide, elle est marquée par deux années extrêmement sèches, les seules de la série. Pour dire que

la pluviométrie reste abondante mais les séquences sèches sont plus prononcées et marquées. Tout ceci confirme le caractère changeant du climat qui est de plus en plus difficile et sévit même dans les zones à pluviométrie abondante.

3.2.2. Intensité et durée des séquences sèches

Au cours des 39 années analysées, il y a eu vingt années sèches. Selon l'indice de sécheresse, on dénote les années légèrement sèches, modérément sèche et extrêmement sèche. Les années légèrement sèches sont de quinze (15), les années modérément sèches sont de trois (3), et les années extrêmement sèches sont de deux (2) et sont récentes (2006 et 2007). L'analyse de la durée des épisodes de sécheresse montre que celle-ci varie au cours du temps. On note des épisodes de sécheresses à court terme et à long terme. La plus longue séquence de sécheresse est de huit (8) années sèches consécutives entre 1986 et 1993. Il y a des épisodes secs de deux (2) ans et des séquences pluvieuses entrecoupées par une année sèche.

Tableau III : Durée des séquences de sécheresses enregistrées durant la période 1980 – 2018 dans la région de Tonkpi

ECHELLE DE TEMPS	DUREE	NOMBRE D'ANNEES
Court terme	Minimale	1
Moyen terme	Moyenne	2
Long terme	Maximale	8

- Fréquence des séquences de sécheresses

L'analyse de la fréquence des épisodes de sécheresse observée dans la région de Tonkpi, montre une proportion supérieure à 50% dans la série d'étude 1980 – 2018 (Figure 2). Ces séquences de sécheresses sont donc plus fréquentes par rapport aux épisodes pluvieux même si la pluviométrie dans l'ensemble reste élevée. La région de Tonkpi est donc sous l'emprise de la sécheresse à un degré moindre.

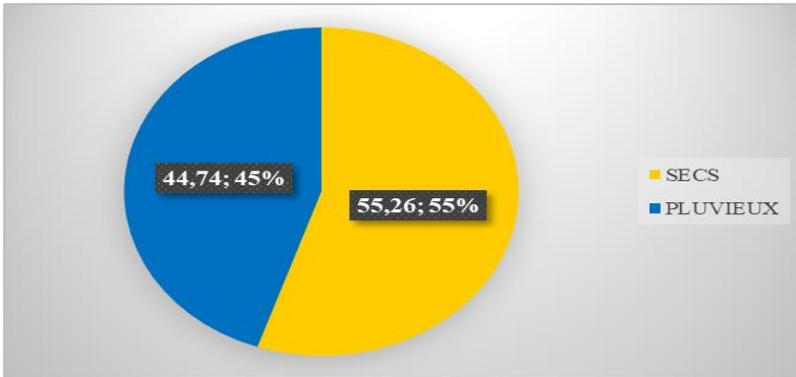


Figure 2 : Fréquence des séquences de sécheresses durant la période 1980 – 2018 dans la Région de Tonkpi

3.2. *Dynamique évolutive du couvert végétal dans la région de Tonkpi par l'indice NDVI des mois de janvier 2000 à 2020*

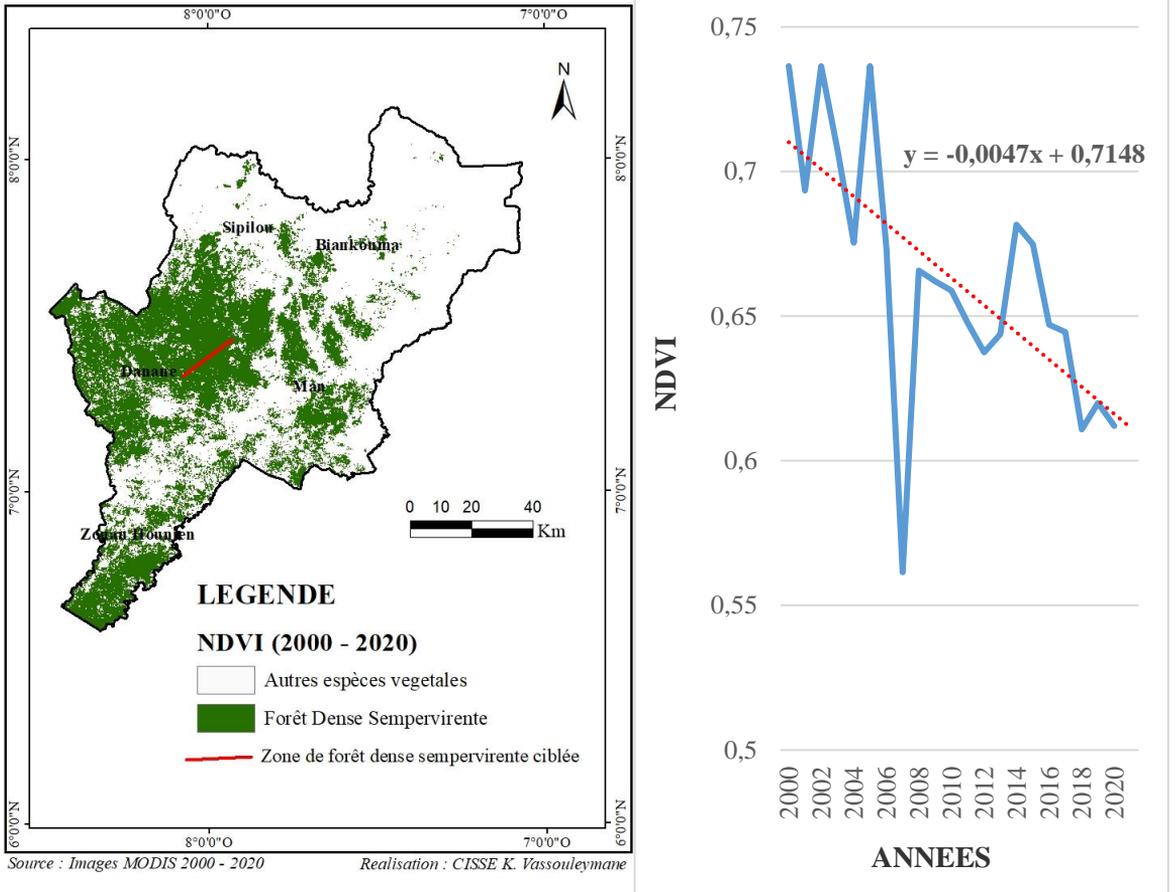
3.2.1. *Evolution temporelle du couvert végétal de la Région de Tonkpi de janvier 2000 à 2020*

L'évolution du couvert végétal dans la région de Tonkpi de janvier 2000 à janvier 2020, est appréhendée par la carte 2. En effet, en ciblant une zone de forêt dense pour faire ressortir le profil de dégradation, cela permet de mieux caractériser l'évolution de la forêt dense dans le Tonkpi.

Pendant la saison sèche, il est possible d'individualiser aisément les différents types de végétations : savanes et forêts. En effet, la savane est caractérisée par un faible indice de végétation, correspondant à un dessèchement des herbacées et à une température de surface plus élevée. Alors que la forêt sempervirente a un indice plus élevé dû à la présence du feuillage des arbres et à une température de surface plus faible due à la protection du couvert végétal. L'indice NDVI peut donc aider en saison sèche, à mettre en évidence des différences de recouvrement arboré. La forêt semi-décidue présente un indice de végétation faible par rapport à la forêt sempervirente et plus élevé par rapport à la savane.

En saison sèche, l'indice NDVI est élevé à partir du moment de la feuillaison des arbres décidus. Toutefois, en zone tropicale humide, les cultures pérennes telles que le café, le cacao, l'hévéa, le palmier à huile... ont les mêmes cycles d'activité chlorophyllienne que la forêt dense et leurs réponses photosynthétiques sont très voisines. Il en est de même pour les cultures vivrières (riz, manioc...) qui ont des indices qui prennent à peu près les valeurs de la forêt semi-décidue. Le suivi de l'évolution du couvert

forestier dans la région de Tonkpi selon l'indice NDVI de 2000 à 2020 est présenté par la figure. Une zone de forêt sempervirente pure a été ciblée et un profil a été tracé.



Carte 2 : Evolution de la végétation sempervirente suivant l'indice NDVI de MODIS de janvier 2000 à 2020

Ainsi, le profil de l'indice de végétation de la forêt sempervirente, est décroissant et montre clairement qu'il y a une nette dégradation progressive de la végétation de 2000 à 2020. En effet, l'indice NDVI étant compris entre -1 et 1, plus il est élevé, plus la forêt se porte bien, et quand il baisse, cela suppose une dégradation de la forêt. Dans notre cas, la forêt sempervirente qui avait un indice de végétation d'environ 0,73 se retrouve

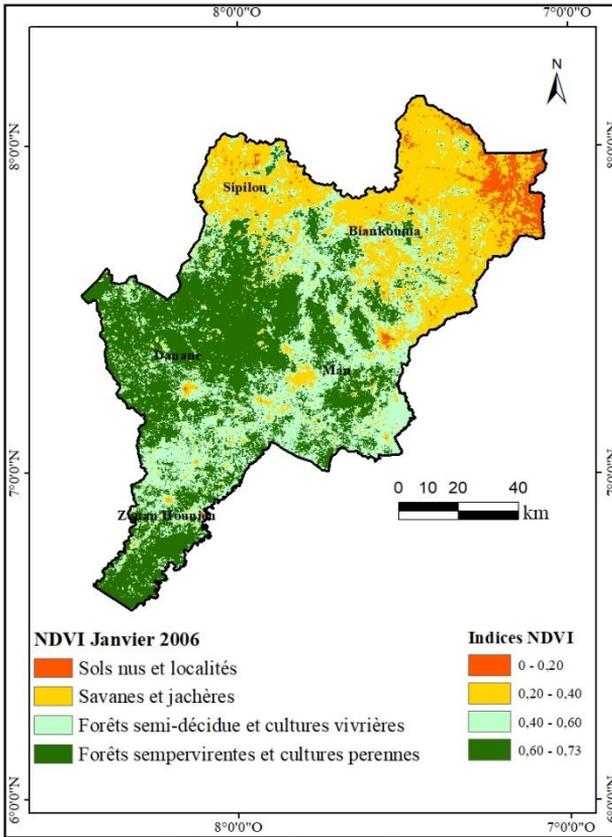
à 0,61 entre 2000 et 2020. Cela montre une légère dégradation de ce couvert forestier au fil du temps.

3.2.2. Rythme saisonnier de la végétation forestière de la région de Tonkpi

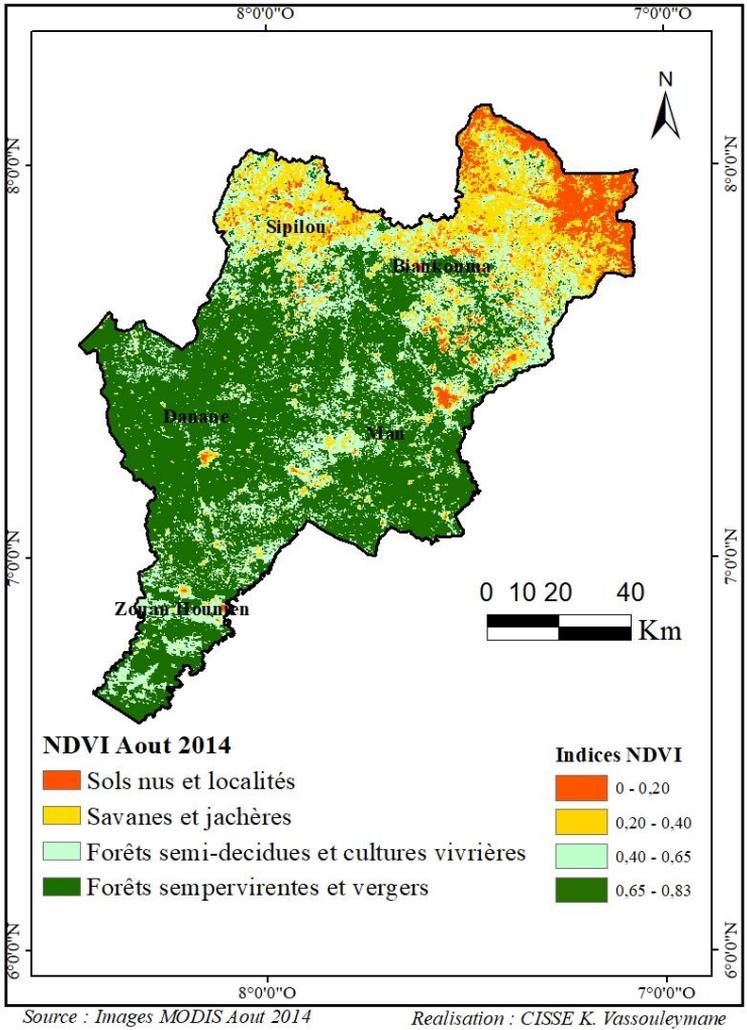
La dynamique du couvert végétal de la région de Tonkpi pendant l'année la plus sèche (2006) et l'année la plus pluvieuse (2014) de la série, est représentée par les cartes 3 et 4. En effet, pour ces deux années « extrêmes », les images du mois le plus sec (janvier) et ceux du mois le plus pluvieux (août) ont été utilisées. Une observation attentive de ces cartes permet de voir le rythme saisonnier de la végétation au cours de ces mois qui sont représentatifs de la saison sèche et de la saison pluvieuse. Le mois de janvier est inclus dans la grande saison sèche. De décembre à février, c'est la grande saison sèche dans la région de Tonkpi. Pendant cette période sèche, il est possible de distinguer aisément les zones de forêt dense sempervirente à celles des forêts denses semi-décidues.

En effet, les forêts denses semi-décidues sont caractérisées par un indice de végétation relativement en baisse durant la saison sèche (0,60 pour l'indice maximal contre 0,65 en saison pluvieuse), ce qui correspond à un dessèchement de la végétation et donc à une température de surface en hausse pouvant atteindre environ 30°C en saison sèche, alors qu'en saison pluvieuse, la moyenne est de 24°C. Les zones de forêt dense sempervirente montrent un indice plus élevé, atteignant 0,83 en saison pluvieuse et 0,73 en saison sèche. Cette végétation sempervirente est marquée par la présence du feuillage des arbres et à une température plus basse, due à l'ombrage provoquée par la protection du couvert végétal. Le NDVI peut donc aider, en saison sèche, à mettre en évidence des différences de recouvrement arboré. Toutefois, il est impossible de séparer le comportement des cultures et de la formation végétale au sein de cette zone forestière. Les vergers tels que le café, le cacao, l'hévéa, le palmier à huile etc. ont les mêmes cycles d'activité chlorophyllienne que la forêt dense et leurs réponses photosynthétiques sont très voisines.

Aussi, les sols et les jachères ont les indices NDVI les plus faibles compris entre 0 et 0,30. On note une modification du rythme saisonnier entre la saison sèche et la saison pluvieuse. Il y a un accroissement un dessèchement de la végétation forestière dense surtout des forêts semi-décidues qui perdent leurs feuilles et qui se reconstituent durant la saison pluvieuse.



Source : Images MODIS NDVI Janvier 2006 Réalisation : CISSE K. Vassouleymane

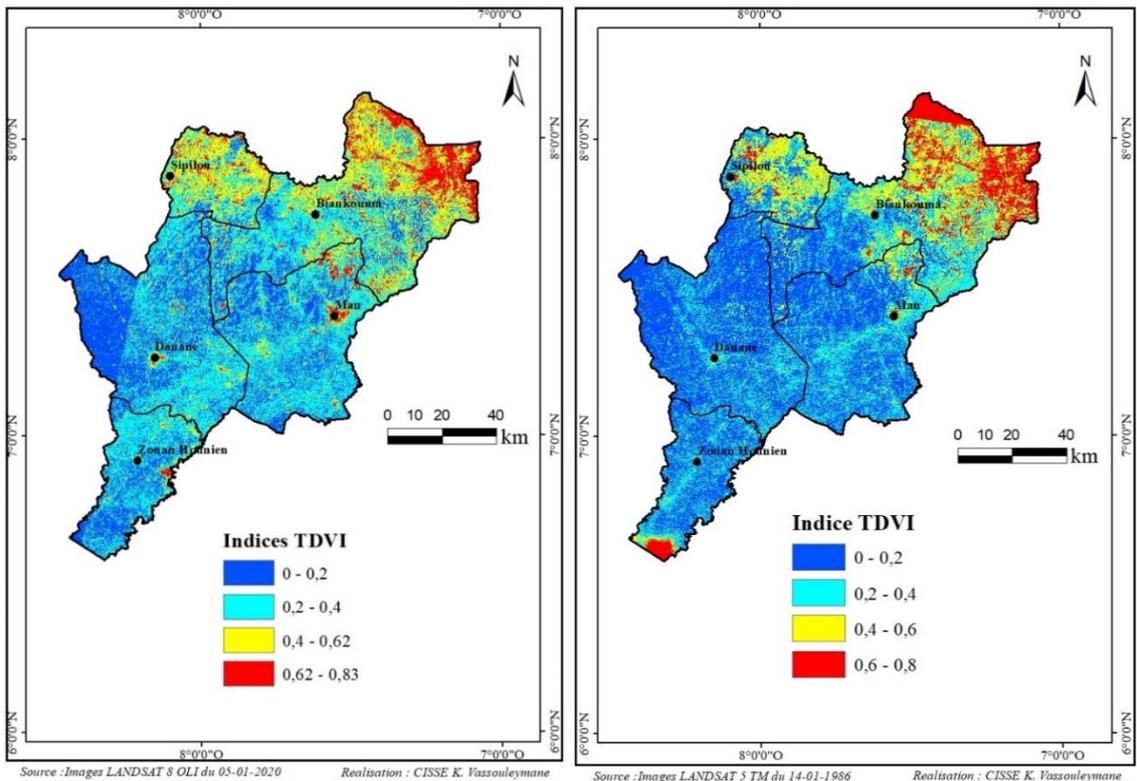


Cartes 3 et 4 : Rythme saisonnier de la végétation de la région de Tonkpi pendant l'année la plus sèche (Janvier 2006) et l'année la plus pluvieuse (Août 2014)

3.2.3. Le stress hydrique en nette progression dans la région de Tonkpi entre 1986 et 2020

L'intensité du stress hydrique a été appréciée par la mesure du potentiel hydrique foliaire à partir de l'indice TDVI. Les variations du potentiel hydrique des différentes classes de végétations sont présentées

par les cartes ci-dessous. La comparaison de ces deux cartes montre qu'il y a une dégradation du couvert végétal dans la région de Tonkpi, occasionnant une diminution simultanée du potentiel hydrique et du contenu relatif en eau, traduisant une déshydratation progressive au fur et à mesure que le stress s'intensifie. En effet, l'indice TDVI, compris entre 0 et 1, rend compte de l'état de la végétation vis-à-vis du stress hydrique. Ainsi, les cartes 5 et 6 présentent le TDVI de la région de Tonkpi en 1986 et en 2020. Ainsi, ces cartes indiquent un stress hydrique entre ces deux dates, puisque plus cet indice est élevé, plus la végétation est desséchée. Les faibles indices (0-0,2) et (0,2-0,4) représentant les zones de savanes et jachères, connaissent un stress hydrique, mais en même temps n'occupaient pas d'aussi grandes superficies. C'était donc des espaces isolés. La végétation forestière dominait l'espace en 1986. La dégradation du couvert végétal dans la région du Tonkpi, avec l'accroissement des espaces de jachères et de cultures, aura des répercussions sur les conditions bioclimatiques puisque le TDVI moyen de l'espace qui était d'environ 0,22 en 1986 est passé à 0,41 en 2020. On assiste donc à un léger accroissement du stress hydrique dans la région de Tonkpi, notamment pendant la saison sèche.



Cartes 5 et 6 : Le potentiel hydrique de la région de Tonkpi par l'indice TDVI en 1986 et 2020

4. Discussion

L'étude de l'évolution de la pluviométrie a montré que la région de Tonkpi est soumise à une variabilité climatique pendant la période 1980 – 2018, même si la zone d'étude est l'une des plus humides du pays. En effet, les résultats de cette étude, ont montré une tendance à la hausse marquée par moment par des anomalies négatives. Des résultats similaires, avaient été déjà trouvés par S. NICHOLSON *et al.*, (2018). Aussi, plusieurs études pluviométriques au niveau de la Côte d'Ivoire, ont révélé une tendance négative vers la fin du 20^{ème} siècle et au début du 21^{ème} siècle. Les années 2002 et 2004 ont été identifiées comme l'année la plus chaude au niveau de la Région de Tonkpi. Cette variabilité climatique a eu plusieurs conséquences, le plus souvent dramatiques : il s'agit des sécheresses des années 1970, 1980, 1984 et 2006 dans plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest (B.T.A. GOULA *et al.*, 2012, p.1070). La Région de Tonkpi connaît des séquences modérées de sécheresses. La sécheresse implique de nombreux problèmes socio-économiques dont les effets sont souvent difficiles à résorber (A.M. KOUASSI, 2007, p.42). Ces conditions climatiques extrêmes pourraient être un facteur essentiel de l'occurrence des feux de brousse de plus en plus fréquents à l'échelle nationale.

Cela a été le cas avec la Région du N'Zi, appelée autrefois la "boucle du Cacao" dans les années 70, qui a perdu ce qualificatif, à cause de la baisse de la pluviométrie dans cette région. La boucle du cacao s'est déplacée maintenant à l'Ouest du pays. En effet, cette zone est caractérisée par d'abondantes pluies pouvant atteindre 1 000 à 2 500 mm/an (LASM, 2000 cité par G.E. SORO *et al.*, 2014, p.115).

La variabilité climatique constatée dans la Région de Tonkpi est liée en partie à la modification des différentes saisons, à l'intensification des séquences sèches et à la réduction de la saison pluvieuse.

Le test de rupture réalisé sur l'intervalle 1980 – 2018, a révélé une rupture en 1996. Paradoxalement la période d'après rupture présente une pluviométrie en hausse par rapport à celle d'avant rupture. Cependant, elle s'inscrit dans le prolongement des séquences de sécheresses observées en Afrique de l'Ouest en générale telles que conclus par certains auteurs (E. SERVAT *et al.*, 1998, p.329 ; J.E. PATUREL *et al.*, 1998, p.941) et en Côte d'Ivoire (BROU *et al.*, 1998 ; BROU, 2005). Cette variabilité climatique a des répercussions au niveau local. En Côte d'Ivoire elle se manifeste

suivant un gradient Sud-Nord. La région de Tonkpi qui est pourtant l'une des régions les plus pluvieuses du pays n'échappe pas à ce dérèglement climatique. Même si la pluviométrie reste dans l'ensemble abondante, elle reste irrégulière par moment. Ainsi, on note des années à pluviométrie faible et à température moyenne élevée. Les saisons pluvieuses sont désormais plus souvent retardées avec un allongement de la saison sèche. Il y a une baisse généralisée des jours pluvieux et une hausse de la température.

L'indice NDVI a permis de mettre en évidence différents aspects de la physiologie et de la biologie de la végétation. Cet indice a permis de caractériser les grands ensembles de végétations avec un peu plus de précisions. Cette méthode avait aussi été utilisée par K.A. KOUAME *et al.*, 2015, qui ont révélé que ces images NDVI sont plus adaptées à la cartographie du couvert végétal en milieu de forêts, car elle permet de discriminer avec plus de précision les différentes couvertures végétales. Aussi, leur étude aborde la problématique de sécheresse forestière, en mettant en relation le cycle végétatif avec la pluviométrie. Ainsi, en cas de sécheresse, la diminution progressive de la biomasse, entraîne une régression des surfaces à forte activité photosynthétique. En conséquence, les surfaces à faible indice de végétation augmentent.

La variabilité ou les fluctuations des paramètres climatiques a des impacts significatifs à court et à long terme sur le développement des espèces forestières. En effet, à court terme, les extrêmes climatiques notamment la sécheresse, causent un stress physiologique ou hydrique qui conduit à la mauvaise croissance de l'arbre pouvant même l'entraîner à la mort. Cependant, à long terme, cette variabilité climatique accrue va jusqu'à modifier progressivement l'activité physiologique des arbres (S. ETZOLD *et al.*, 2003, p.187). En effet, pour le bon fonctionnement des végétaux, il faut que leurs fonctions vitales soient remplies. Cela passe par une bonne disponibilité en eau. L'absorption des nutriments du sol, leur distribution entre la cime, le tronc et les racines, ainsi que les réactions métaboliques, l'intégrité structurelle et fonctionnelle des tissus végétaux, sont directement liées au régime hydrique de la plante. Ainsi, une réduction de la disponibilité en eau a des répercussions directes sur le processus de croissance et de développement du couvert forestier (T.C. HSIAO, 1973, p.529). Même si les arbres ont une longue durée de vie, il n'en demeure pas moins qu'ils sont exposés à des dommages irréversibles en cas de manque d'eau (sécheresse).

La sécheresse est l'un des facteurs abiotiques les plus préjudiciables à travers le monde. Elle peut gravement entraver la productivité des cultures agricoles. Cependant, même dans les zones tropicales où les pluies fournissent en moyenne 2 600 mm d'eau annuellement, la réserve en eau du sol peut diminuer fortement durant la saison sèche et limiter la croissance de la végétation (G. CORNIC et A. MASSACCI, 1996, p.351). Le stress hydrique est en rapport avec la disponibilité d'eau dans les sols. C'est donc un accident relativement fréquent dans les sols en saison sèche, puisqu'à cette période, le sol se caractérise par une faible réserve hydrique. Il affecte plusieurs variables dans la physiologie de la plante, telles que la régulation de la température foliaire (N.R. PATEL et *al.*, 2001), la conductance stomatique et la surface foliaire, ainsi que la photosynthèse avec pour conséquence une limitation biochimique des chloroplastes qui servent à fixer le dioxyde de carbone (F. TARTIEU et T. SIMONEAU, 1998, p.53). Les processus physiologiques qui affectent la croissance des feuilles sous contrainte de la sécheresse, telles que les propriétés mécaniques de la paroi cellulaire ou des propriétés hydrauliques de cellules en croissance ont été largement étudiés. Le stress hydrique entraîne une modification de l'expression de nombreux gènes.

La variabilité climatique observée ces dernières années dans la région de Tonkpi, qui se caractérise par l'alternance des périodes humides et sèches; le raccourcissement de la saison de pluie et la mauvaise répartition de cette dernière, vient aggraver une situation qui était déjà très préoccupante. Et cette situation ne fera qu'accentuer le déficit d'eau dans les réserves du sol.

En effet, le déficit hydrique est une contrainte permanente de la production agricole. Il est à l'origine des pertes de production agricole dans de nombreuses régions. Les risques du manque d'eau sont et deviendront de plus en plus fréquents et persistants, à l'avenir, par suite des changements climatiques causés par l'effet de serre (J. WITCOMBE, 2009).

Conclusion

Cette étude a permis de montrer l'évolution pluviométrique de la Région de Tonkpi. Toutefois, cette variation du climat se matérialise par l'alternance des séquences sèches et de séquences humide.

Pour la caractérisation de la sécheresse météorologique, l'Indice Standardisé de Précipitations (ISP) utilisé, révèle que, la région de Tonkpi comme toutes les régions de Côte d'Ivoire, est affectée par plusieurs périodes sèches sur la série 1980 - 2018. Les sécheresses les plus

remarquables par leur intensité, leur durée et leur fréquence, ont été observées durant la période 1986 – 1993. Ces épisodes secs ont atteints leur paroxysme en 2006 et en 2007 avec des sécheresses de type extrêmement sévère. Les deux dernières années de notre série (2017 et 2018), ont été sèches. Cette variabilité climatique a des répercussions sur le couvert forestier. Les images NDVI de MODIS ainsi que l'indice TDVI ont permis d'évaluer le niveau de stress hydrique du couvert forestier dans la région de Tonkpi. Cette zone est marquée progressivement par le stress hydrique notamment en saison sèche et pendant les années où la pluviométrie est déficitaire.

Références bibliographiques

- BIEMI Jean, AFFIAN Kouadio., GOIAN G., JOURDA Jean Patrice., et KOUAME Fernand., 1997, « Système d'informations hydrogéologiques pour une évaluation des potentialités hydriques en milieu cristallin fissuré : cas de la région de Biankouma-Man (Ouest de la Côte d'Ivoire) », Actes des VII èmes journées scientifiques du réseau télédéacteur de l'AUPELF, Sainte FOY, Québec (Canada).
- BROU Yao Telesphore, CHALEARD Jean Louis, 2007, « Visions paysannes et changements environnementaux en Côte d'Ivoire », *Annales de Géographie*, 116 è année, N°653, pp. 65-87
- CORNIC Gabriel et MASSACCI Angelo, 1996, « Photosynthèse des feuilles sous stress hydrique », In Baker, NR (eds) *Photosynthèse et Environnement. Avancées en Photosynthèse et Respiration*, vol 5. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/0-306-48135-9_14
- ETZOLD Sophie, WUNDER Jan, BRAUN Sabine, ROHNER Brigitte, BIGLER Christof, ABEGG Meinrad, RIGLING Andreas, 2016, « Mortalité des arbres forestiers: causes et tendances », In *Forêts et changements climatiques. Éléments pour des stratégies d'adaptation*, Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne; Institut fédéral de recherches WSL, Birmensdorf; Haupt, Berne, Stuttgart, Vienne. 183-203.
- FAYE Cheick, N'DIAYE A., M'BAYE I., 2017, « Une évaluation comparative des séquences de sécheresse météorologique par indices, par échelles de temps et par domaines climatiques au Sénégal », *J. Wat. Env. Sci.* Vol. 1, N°1, (2017), pp. 11-28, ISSN : 2509-0445 <http://revues.imist.ma/?journal=jwes>
- GIEC, (2007), « Bilan des changements climatiques: Impacts, adaptation et vulnérabilité », Contribution du Groupe de travail II au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cambridge University Press.
- GOULA Bi Tié Albert, SORO Emile Gneneyougo, KOUASSI Williams, SROHOUROU Bernard, 2012, « Tendances et ruptures au niveau des pluies journalières extrêmes en Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest) » In *Hydrological Sciences Journal*, 57 (6), 1067-1080. doi: 10.1080/02626667.2012.692880
- HSIAO Theodore, 1973, « Plant responses to water stress », In *Annu. Rev. Plant Physiol.* 24, 519-570.
- HUBERT P., SERVAT Eric, PATUREL Jean-Emmanuel, KOUAME Brou, BENDJOURDI H., CARBONNEL J.P. et LUBES-NIEL Hélène, 1998, « La procédure de segmentation, dix ans après. Publication IAHS, n°250, pp.267- 273.

- KELI Zagbahi Jules, 2017, « La direction régionale du CNRA de Man en quelques mots et chiffres », CNRA région du Tonkpi, 11p.
- KOUASSI Amani Michel, 2007, « Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit, et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire », Thèse de doctorat, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 210 p.
- LUBES-NIEL Hélène, MASSON Jean-Marie., PATUREL Jean-Emmanuel et SERVAT Eric, 1998, « Variabilité Climatique et statistique : Etude de la simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques », In « Revue des sciences de l'eau, 1998, 3, pp. 383-408, ISSN 0992-7159
- McKEE T.B., DOESKEN N.J. et KLEIST J, 1993, « The relationship of drought frequency and duration to time scale », in Proceedings of the Eighth Conference on applied Climatology, Anaheim, California, du 17 au 22 janvier 1993, Boston, American Meteorological Society, pp.179-184
- NICHOLSON Sharon, FUNK Chris et FINK Andreas, 2018, « Précipitations sur le continent africain du XIX ème au XXI ème siècle », In *Changement global et planétaire* n°165 (5-6), pp. 114-117.
- PATEL Niraj R., MEHTA A.N., SHEKH A.M., 2001, « Canopy temperature and water stress quantification in rainfed pigeon pea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.). Agricultural and forest Meteorology, 109 (3) : pp. 223-232.
- PATUREL Jean-Emmanuel, SERVAT Eric, DELATTRE Marie-Odile & LUBES-NIEL Hélène., 1998, « Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique », *Hydrological Sciences Journal*, 43:6, pp. 937-946, DOI: 10.1080/02626669809492188.
- SAWADOGO Louis, 2009, « Influence de facteurs anthropiques sur la dynamique de la végétation des forêts classées de Laba et de Tiogo en zone soudanienne du Burkina Faso », Thèse de Doctorat d'Etat. Université de Ouagadougou, 142 p.
- SERVAT Éric, PATUREL Jean-Emmanuel, LUBES-NIEL Hélène, KOUAME Brou, MASSON Jean-Marie, TRAVAGLIO Michel & MARIEU Bertrand, 1999, « De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne ». *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 12 (2), pp. 363-387. <https://doi.org/10.7202/705356ar>
- SERVAT Eric, PATUREL Jean-Emmanuel, KOUAME Brou, TRAVAGLIO Michel, OUEDRAOGO Mahaman, BOYER Jean-François, LUBES-NIEL Hélène, FRITSH Jean-Marie, MASSON Jean-Marie, MARIEU Bertrand, 1998, « Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'ouest et centrale In *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century*, IAHS Publication: Abidjan; pp 323-337.
- SORO Gneneyougo Emile, ANOUMAN D.G.L., GOULA BI Tié Albert, SROHOROU Bernard, SAVANE Issiaka, 2014, « Caractérisation des séquences de sécheresse météorologique à diverses échelles de temps en climat de type Soudanais : cas de l'extrême Nord-ouest de la Côte d'Ivoire », *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°18, Juin 2014, pp.107-124.
- STANGA Iulian Catalin, 2009, « Quantifier la sécheresse. Durée, intensité, fréquence », *Analele Stiintifice ale Universităţii Al I. Cuza" Iaşi*, Tom LV s. II - c, Geografie 2009, pp. 31-46.

TARTIEU Francois et SIMONEAU Thierry, 1998, « Variabilité entre les especes du contrôle stomatique en fonction de l'état hydrique du sol et de la demande evaporative fluctuants : modelisation des comportements isohydriques et anisohydriques », In *Journal de botanique experimentale* 49 (90001) : pp. 419-432

WANDAN Narcisse Eboua, TIESSE BI Cyrille, DIBI N'Da Hyppolite, 2017, « Apport de la télédétection pour le suivi spatio-temporel de l'occupation du sol dans la région montagneuse du Tonkpi (Côte d'Ivoire) », in *European Scientific Journal*, Vol. 13, n°15, pp. 310-329.

WITCOMBE John, 2009, « Breeding for abiotic stress for sustainable agriculture », *Phil. Trans. R. Soc. B.*, 363, pp. 703-716