

Dynamique spatio-temporelle des feux de 2001 à 2019 et dégradation du couvert végétal en zone de contact forêt-savane, Département de Toumodi, Centre de la Côte d'Ivoire

Kueshi Sémanou DAHAN^{1*}, Hyppolite DIBI N'DA^{2,3} et Chimène ASSI KAUDJHIS³

¹ *Université Félix Houphouët-Boigny, UFR Biosciences, Centre d'Excellence Africain sur les Changements Climatiques, la Biodiversité et l'Agriculture Durable (CEA-CCBAD), 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

² *Université Félix Houphouët-Boigny, UFR Biosciences, Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), Laboratoire de Botanique, 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

³ *Université Félix Houphouët-Boigny, UFR Biosciences, Laboratoire de Botanique, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

(Reçu le 12 Mai 2021 ; Accepté le 09 Août 2021)

* Correspondance, courriel : dkueshi09@gmail.com

Résumé

Face à leurs statuts particuliers en termes de vulnérabilité, les zones de contact forêt-savane sont sous la pression de plusieurs facteurs en Afrique de l'Ouest. A cet effet pour une gestion durable de cet écosystème, la présente étude vise à étudier la dynamique spatio-temporelle des feux de 2001 à 2019 et leurs impacts sur la végétation en zone de contact forêt-savane (département de Toumodi) au centre de la cote d'ivoire. L'approche méthodologique s'est focalisée sur la télédétection et la cartographie sans oublié la collecte des données de terrains qui sont entre autres les points de contrôlées de validation de la classification des images satellitaires et l'analyse des strates. Ainsi, une série de 19 (dix-neuf) images sa, et 2 (deux) images satellitaires Landsat ETM+2000 et Landsat-8 OLI 2019, pour l'élaboration des cartes d'occupation du sol ont été utilisées. Il en résulte que les superficies les plus brûlées sont détectées à partir du mois de novembre jusqu'en février. Quant à l'évolution annuelle, les surfaces brûlées ne suivent une tendance peu définie, mais, cependant la période d'étude (2001 à 2019) indique des superficies brûlées considérables chaque année. De façon générale, il est à souligner que le couvert végétal subit une régression progressive face aux menaces du feu.

Mots-clés : *feux, couvert végétal, image MODIS, télédétection, Toumodi, Côte d'Ivoire.*

Abstract

Spatio-temporal dynamics of fires from 2001 to 2019 and degradation of vegetation cover in the forest-savanna contact zone (Toumodi Department) in central Côte d'Ivoire

Due to their particular status in terms of vulnerability, forest-savanna contact zones are under pressure from several factors in West Africa. To this end, for a sustainable management of this ecosystem, the present study aims to investigate the spatio-temporal dynamics of fires from 2001 to 2019 and their impact on vegetation in the forest-savanna contact zone (Toumodi department) in central Côte d'Ivoire. The methodological

approach focused on remote sensing and mapping without forgetting the collection of field data which are, among others, the validation control points for the classification of satellite images and the analysis of strata. Thus, a series of 19 (nineteen) MODIS MCD64A1 (2001 to 2019) satellite images in hdf format for burns mapping, and 2 (two) Landsat ETM+2000 and Landsat-8 OLI 2019 satellite images for land cover mapping were used. As a result, the most burnt areas are detected from November to February. As for the annual evolution, the burnt areas do not follow a clear trend but, nevertheless, the study period (2001 to 2019) indicates considerable burnt areas each year. In general, it should be emphasised that the vegetation cover is gradually declining in the face of the threat of fire.

Keywords : *fire, vegetation cover, MODIS image, remote sensing, Toumodi, Côte d'Ivoire.*

1. Introduction

La gestion de l'environnement, la conservation et l'utilisation durable de la biodiversité constituent, depuis quelques décennies, une préoccupation internationale majeure pour la communauté scientifique et les décideurs politiques [1]. Selon les estimations de la [2], 420 millions d'hectares constituent la superficie forestière mondiale perdue depuis 1990 en raison de la déforestation : la conversion de terres forestières à d'autres usages, notamment l'agriculture. L'Afrique a enregistré le taux annuel de perte de forêts le plus élevé sur la période 2010-2020, avec 3,9 millions d'hectares [2]. Selon [3], les forêts tropicales et subtropicales claires, les terres boisées et les savanes, qui connaissent une saison sèche distincte, couvrent une superficie d'environ 2,3 à 2,6 milliards d'hectares (soit 23 à 26 millions de kilomètres carrés) et sont brûlées périodiquement, selon des intervalles allant de un à quatre ans. Aussi, dans les savanes tropicales en particulier, il est établi que les feux itératifs ont une influence néfaste sur la durabilité des ressources et services écologiques [4, 5]. En générale, le feu constitue, aussi bien en milieu tropical que méditerranéen, l'un des facteurs principaux de transformation et de dégradation du milieu naturel [6]. Selon [7], durant une année d'activité intense, les feux de forêt peuvent ravager 7,5 millions d'hectares, soit un territoire aussi vaste que celui de l'Irlande. En plus de leurs effets dévastateurs, ils peuvent alors participer à la dynamique des écosystèmes en impactant positivement leur structure et leur production [8, 9].

Le problème de ces feux fascine depuis longtemps le monde scientifique [10, 11], car ils contribuent au changement climatique en provoquant des émissions de GES (Gaz à Effet de Serre) radiatifs et photochimiquement actifs, d'aérosols et de particules, affectant la composition et le fonctionnement de l'atmosphère globale [12 - 15]. Les effets de ces feux sont induits par les incendies dépendent du type d'incendie, du régime (fréquence, saison et intensité des incendies), du type de végétation, du stade phénologiques, mais aussi des températures générées pendant les incendies [16]. Ce qui affecte directs la société (perte de vie, personnes blessées, brûlées, asphyxiées, sans abri déplacées) et les biens (destruction, détérioration et endommagement des plantations, du bétail, des maisons et des structures, paralysie des services publics avec la destruction des réseaux électriques et téléphoniques) [17 - 19]. En Côte d'Ivoire, la surface forestière, estimée à plus de 15 millions d'hectares en 1960, est passée à moins de la moitié en 2000 [20]. Pour lutter contre l'impact des feux sur le couvert végétal, la Côte d'Ivoire depuis les années 1983-84, a mis sur pied la SODEFOR pour minimiser le risque de perte de matériaux de construction et de biodiversité en cas d'incendie [21]. La situation est de même préoccupante et fait l'objet de plusieurs études [11, 16, 21]. Cette dégradation de plus en plus remarquable est causée par des facteurs anthropiques y compris les feux, qui modifient la structure spatiale du couvert végétal. Ainsi la présente étude dans sa dynamique veut contribuer à la connaissance de la dynamique spatio-temporelle des feux et leurs impacts sur le couvert végétal dans le département de Toumodi au centre de la cote d'ivoire.

2. Matériel et méthodes

2-1. Zone d'étude

Situé entre les latitudes 6° 00' 0" et 6° 55' 0" Nord et les longitudes 5° 00' 5' 30' 0" Ouest le site d'étude est limité par les départements de Yamoussoukro et de Dimbokro au nord, à l'Ouest par celui d'Oumé, à l'est par le département de Bongouanou et au Sud par le département de Tissalé. La région est dominée par une végétation de savane boisée, avec une forte densité d'arbustes, surplombés des grands arbres, comme les fromagers (*Ceiba pentadra*). Par ailleurs, l'on note la présence d'autres espèces telles que le lingué (*Azelia africana*), le néré (*Parkia biglobosa*), le kodabéma (*Aubrevillea kerstingii*), l'acajou à grandes feuilles (*Khaya grandifoliola*), l'iroko (*Milicia excelsa*), le chiendent (*Impereta cylindrica*) et le "sékou touré" (*Chromolaena odorata*).

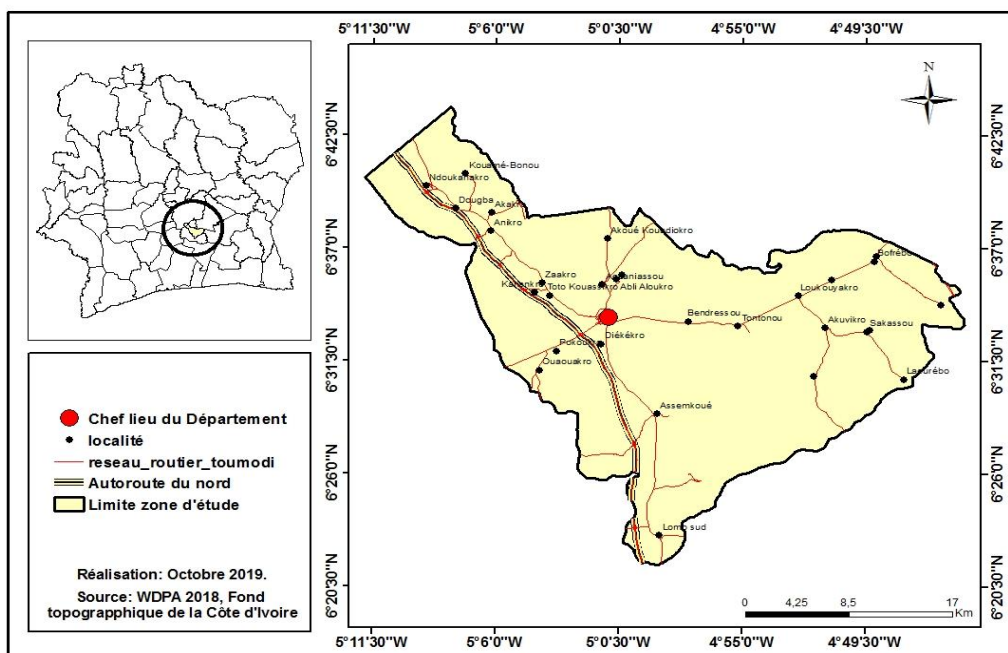


Figure 1 : Carte de la localisation géographique de la zone d'étude

2-2. Matériel et données

Des données cartographiques telles que les couches vecteurs (le réseau routier, les localités), en extension "shapefile" issus de la base de données de WPDA (World Database on Protected Areas) ont été utilisées. Pour le traitement, les Logiciels : (ENVI 4.7 ; ArcGis 10.3 ; et Microsoft Excel 2013) ont été utilisés. Ainsi, Envi 4.7 a servi dans pour le prétraitement puis le traitement des images et la classification ; Arcgis Desktop version 10.3 a été utilisé pour les géotraitements des données d'occupations du sol et les différents rendus cartographiques quant au Microsoft Excel 2013 il a servi dans la réalisation des différents graphiques et l'analyse statistique des résultats obtenus. Le matériel de terrain est composé de GPS (Global Position Système) de marque Garmin, et des fiches d'inventaire pour la consignation des données collectées. La Cartographie de la dynamique spatio-temporelle des feux a été analysée à travers les séries temporelles mensuelles d'images MODIS (2000 à 2019) ont été utilisées. Elles sont choisies en raison de leurs disponibilités, leur accessibilité, de leurs capacités de couverture journalière de grandes étendues, et leur résolution spatiale de 250 m [23]. Le produit Modis burned areas (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) utilisé est issu de la collection 6 [24] à savoir MCD64A1 de résolution spatiale de 250m avec une résolution temporelle journalière résumée

en des données de surfaces brûlées mensuelles. Le produit MCD64A1 de MODIS fournit une détection des surfaces brûlées tous les mois avec une précision de 250 m [24]. MCD64A1 exploite et localise l'occurrence d'un changement brusque de réflectance à la surface selon la méthode décrite par [25]. Dans la présente étude, sur la période d'étude (2001 à 2019), deux cent vingt-huit (228) images ont été acquises en raison d'une image par mois. Par rapport à l'évaluation de l'impact de l'occurrence des feux sur la dynamique du couvert végétal, les données satellites ont été acquises sur le site www.earthexplorer.org avec une couverture nuageuse de moins de 10 %. Trois images ont été téléchargées (landsat 8-OLI TIRS acquise le 20 janvier 2019 ; landsat 7 ETM+ acquise le 09 février 2000). L'utilisation des images Landsats pour la réalisation des cartes d'occupation du sol se justifie par le fait qu'elles disposent de bonnes caractéristiques. Une résolution temporelle de 16 jours pour Landsat 4, 5 et 7 ; une bonne résolution spatiale. Chaque jeu d'image porte sur une étendue de 185 km, avec une résolution spatiale générale de 30 mètres.

2-3. Méthode de cartographie de la dynamique spatio-temporelle des feux en zone de contact forêt-savane du département de Toumodi

2-3-1. Traitement des images sur les feux

L'analyse spatiale et temporelle des feux a été faite à travers le logiciel ArcGis 10.3. Il a été utilisé pour le traitement des images, l'extraction des superficies brûlées et la cartographie.

2-3-2. Suppression des valeurs non pertinentes

Les données Modis « burn data » couvrant une période d'un mois se présentent sous une série d'images élémentaires décrites par six ensembles d'information [26] : 0 : non brûlée ; 1-366 : jours approximatifs de feu correspondant au calendrier grégorien ; 900 : neige ou haut aérosol ; 9998 : eau continentale ; 9999 : eau maritime (mer et océan) ; 10000 : non classifié, car pas assez de données. Le traitement fait concerne que les pixels ayant des valeurs pertinentes de « 1 à 366 » couvrant le mois donné qui présentent une meilleure probabilité de contenir un événement de feu. Par conséquent les autres valeurs comportant toute autre information sont supprimées.

2-3-3. Découpage de la zone concernée

Le shapefile de la zone d'étude est superposé aux couches cartographiques obtenues à partir de Modis. Cette opération a permis d'obtenir les statistiques sur les surfaces brûlées et l'élaboration des cartes de distribution spatiale des feux.

2-3-4. Calcul des surfaces brûlées

Le calcul des surfaces brûlées par an à l'échelle de la zone d'étude a été effectué. Les images, projetées en projection UTM 30 N correspondant à la zone d'étude, sont converties en *shapefile*. Le calcul des surfaces brûlées est réalisé après vectorisation (transformation du format hdf en format shp).

2-3-5. Analyse spatio-temporelle des feux

Cette analyse concerne l'évolution des incendies dans le temps, présentant : les surfaces brûlées totales et moyennes par année.

2-3-6. Occurrence des feux

La fréquence des feux est obtenue à partir de la combinaison des cartes annuelles de l'indicateur de surfaces brûlées. Les valeurs de cet indicateur sont regroupées en quatre classes : non brûlée, faiblement brûlée, moyennement brûlée, fortement brûlée. Ces classes sont obtenues après calcul de la moyenne et de l'écartype à travers le module « *summaryse* » du logiciel Arc Gis 10.3.

2-4. Méthode d'évaluation de l'impact de l'occurrence des feux sur la dynamique du couvert végétal dans la zone de contact forêt-savane du département de Toumodi

2-4-1. Dynamique du couvert végétal

2-4-1-1. Traitement des données satellites et collecte des données de terrain : correction radiométrique et atmosphérique

Dans ce travail, les images ont d'abord fait l'objet d'un traitement radiométrique et atmosphérique assorti d'un géoréférencement. Du point de vue pratique la correction radiométrique réalisée a consisté à corriger les effets des différents artefacts qui perturbent la mesure radiométrique telle que les irrégularités du capteur, des bruits dus au capteur. Quant à la correction atmosphérique, elle aide à atténuer les effets liés aux angles d'incidence solaire et aux effets atmosphériques, lesquels changent les propriétés spectrales spécifiques des catégories d'occupation sur l'image. Ces corrections ont aussi pour but de corriger certaines variations de la distribution des données causées par le décalage temporel dans l'acquisition des images. En effet, les facteurs comme l'angle d'élévation du Soleil, la distance Terre-Soleil, la calibration des capteurs, les conditions atmosphériques et la géométrie de visée affectent la valeur numérique des pixels [27]. Les propriétés optiques de l'atmosphère varient considérablement dans le temps et dans l'espace. Elles dépendent du contenu de la vapeur d'eau et de la quantité d'aérosols. Le signal capté par le satellite est modifié, d'une part, par des phénomènes de diffusion, de réflexion et d'absorption et, d'autre part, par les rapports géométriques entre le satellite, la cible et le soleil (angles et azimuts). La réflectance mesurée par le satellite est donc différente de celle de la surface terrestre. Plusieurs auteurs ont développé des modèles de corrections atmosphériques pour prendre en compte ces différents paramètres [28]. Dans le cadre du présent travail, le module FLAASH du Logiciel ENVI 4.7 a été utilisé. Ce dernier à travers, l'outil FLAASH *Atmospheric correction*, permet d'afficher l'onglet d'intégration des paramètres. On commence par faire entrer les paramètres suivants : l'image de radiance (input radiance image) ; nommer fichier de sortie de la réflectance (*output reflectance file*) ; nommer les fichiers de sortie directrices de la correction atmosphérique FLAASH (*output directory FLAASH files*) ; et le nom d'origine des fichiers FLAASH (*rootname for flaash files*). Ensuite, les paramètres (de date, de l'heure de la prise de vue, d'altitude du satellite et de la taille du pixel de l'image), sont renseignés. Enfin, l'opération finale est lancée. Cette correction est importante, car elle améliore la lisibilité de l'image.

2-4-1-2. Préparation de la collecte des données

Il a été calculé de l'indice de végétation normalisé (NDVI) et transformation *tasseled Cap* qui permet de mettre en évidence la végétation et le sol nu. Le NDVI a été calculé ici, du fait qu'il est un indicateur biophysique potentiel du climat qui traduit l'activité photosynthétique du couvert végétal à l'instant de la mesure [29]. Il se calcule selon la **Formule** ci-dessous :

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - R) / (\text{PIR} + R) \quad (1)$$

où, PIR est la réflectance de la végétation dans le proche infrarouge et R celui dans le rouge.

Ainsi, le NDVI se calcule, respectivement, à partir des bandes TM et ETM+ selon les **Formules** suivantes :

$$\text{NDVI} = (\text{TM4}-\text{TM3})/(\text{TM4}+\text{TM3}) \text{ ou } \text{NDVI} = (\text{ETM}+4-\text{ETM}+3)/(\text{ETM}+4 + \text{ETM}+3) \quad (2)$$

Sa valeur se situe entre -1 et 1. Plus on s'approche de 1, l'indice de végétation normalisé est élevé. *Brightness Index: Tasseled Cap Transformation* [30] ou indice de Brillance des sols (BI) a été appliqué. C'est un indice qui est sensible à la brillance des sols, il permet de mieux discriminer les sols nus des autres typologies d'occupation de sol.

$$\text{BI} = (\text{R}^2 + \text{PIR}^2)^{1/2} \quad (3)$$

Wetness Index: Tasseled Cap Transformation [30] ou indice d'humidité (WI) a été appliqué. Le NDWI ou le WI (*Normalized Difference Water Index*) maximise la réflectance de l'eau en utilisant la bande verte, et minimise celle des masses d'eau en utilisant le proche infrarouge, sur les images Landsat.

$$\text{WI} = \text{PIR}-\text{MIR} / \text{PIR}+\text{MIR} \quad (4)$$

Ces différents indices (NDVI et transformation *Tasseled Cap*) ont tous été appliqués sur l'image Landsat 7 ETM+ 2000 et Landsat 8 OLI-TIR 2019 pour la détection des typologies d'occupation du sol.

2-4-1-3. Composition colorée

A la suite de l'indice de végétation normalisée, la composition colorée a permis de faire une discrimination spectrale des différents types d'occupation du sol de façon plus précise. Ce traitement s'est appuyé sur la connaissance du comportement spectral des différents types d'occupation du sol dans les diverses longueurs d'onde et leur exploitation dans une synthèse additive de couleurs primaires Rouge-Vert- Bleu et des couleurs secondaires (Cyan-Magenta-Jaune) [31]. Pour la présente étude, les compositions colorées choisies sont celles des bandes 4-5-6 pour les deux images Landsat (Landsat 7 ETM+ et Landsat 8 OLI-TIR), car elles présentent une meilleure discrimination des types d'occupation du sol retenus. Pour ces dernières, il a été affecté dans la faisabilité respectivement les bandes 4 et 5 du visible, la bande 6 du proche infrarouge. Un rehaussement des images (Landsat 7 ETM+ et Landsat 8 OLI-TIR) obtenues a permis d'améliorer la qualité visuelle.

2-4-1-4. Choix des sites à visiter

Grâce à l'indice de végétation NDVI et les différentes compositions colorées, les surfaces de forêt, de savanes, d'eau et de sol nu ont été détectées. Outre ce qui précède, les connaissances théoriques du milieu d'étude basée sur la revue bibliographique nous ont été bénéfiques. Ainsi, 90 points de contrôle ont été sélectionnés. Ces points ont été choisis sur la base des caractéristiques physiques et biologiques qui sont entre autres leur homogénéité, leur réflectance, etc.

2-4-1-5. Collecte des données de terrain

Sur le terrain, points présélectionnés ont été localisés à l'aide du GPS. Une description visuelle de leur structure a été faite sur les critères suivants : nombre strates ; hauteur de différentes strates ; le taux de recouvrement total ; les actions anthropiques. En plus des points préalablement choisis, d'autres points supplémentaires (145) de validation ont été pris sur le terrain à l'aide de GPS. L'accent a été mis sur le terrain sur l'ensemble des types d'occupation de sol et plus précisément les forêts dégradées et les forêts denses. L'interprétation des informations issues des images nous a permis de sélectionner plusieurs zones forestières que nous avons visitées. Outre ces zones, d'autres formations végétales ont été visitées.

2-4-1-6. Adoption de légende

Seize types (16) d'occupation du sol assorti des travaux de terrains ont été décrits. Il s'agit notamment des îlots de forêt, des galeries forestières, des forêts dégradées, des vieilles jachères, des plantations d'hévéa mature, des plantations de tecks, des savanes boisées, des savanes arborées, des cacaoyers, des palmeraies, des bananeraies, des savanes arbustives, des cultures vivrières, des pelouses, des habitations et les cours d'eau. Pour élaborer les cartes de la dynamique du couvert végétal, trois (3) grandes unités d'occupation du sol ont été adoptées afin d'atteindre l'objectif fixé. Les grandes unités sont les suivantes : non-forêt, forêt dense et forêt dégradée.

2-4-1-7. Classification d'image et production cartographique

Dans la présente étude, la classification supervisée a été utilisée. Elle s'inscrit donc dans un cheminement classique de classification dirigée. Cette classification a été utilisée compte tenu de la connaissance du terrain. Elle a consisté à identifier visuellement un certain nombre d'éléments ou objets naturels ou artificiels qui peuvent être ponctuels, linéaires ou surfaciques sur l'image. Ladite classification sous le logiciel de traitement d'image ENVI 4.7 se déroule en quatre (4) phases essentielles que sont : la définition de la légende ou le renseignement du ROI (*Regions Of Interest*) ; la sélection des échantillons de parcelles d'entraînement (ou *Regions*) ; la description et renseignement des différentes classes ; le choix de l'algorithme de classification. Les unités : "non forêt", forêt dense et forêt dégradée ont été définies pour la légende. Ce qui a conduit à la sélection des parcelles d'entraînement. Ainsi, ces classes sont définies suivies de l'attribution des couleurs. L'algorithme *Maximum Likelihood* (maximum de vraisemblance) est choisi pour la classification, car il nous permet de mieux faire une comparaison des résultats obtenus et la réalité du terrain. Il permet de classer les pixels inconnus en calculant pour chacune des classes la probabilité pour que le pixel tombe dans la classe correspondante. Cependant si cette probabilité n'atteint pas le seuil escompté, le pixel est classé inconnu.

2-4-1-8. Évaluation et validation de la classification supervisée

La validation de la classification s'est faite en deux étapes. La première étape a consisté en une analyse thématique visuelle comparée entre les compositions colorées de base 4-5-6 et les cartes obtenues. Pour ce faire, une analyse comparative visuelle de la composition colorée de base et de la carte d'occupation du sol produite est réalisée. Lorsqu'il y a une conformité entre les deux données alors l'analyse thématique est validée. La seconde étape a consisté en une analyse des matrices de confusion pour évaluer le niveau de performance du traitement, mais également des classes d'occupation du sol à travers la précision globale et le coefficient de Kappa. Selon [32] l'indice de Kappa caractérise le rapport entre les pixels bien classés et le total des pixels sondés. Une fois la classification validée par les différents tests de performance ci-dessus, un filtre médian 3*3 permet de réduire l'hétérogénéité intra classes par élimination des pixels isolés. La matrice de confusion se présente comme suit : les lignes représentent l'affectation des pixels à chaque thème après classification ; les colonnes indiquent la répartition réelle des pixels dans chaque thème et la diagonale représente les pourcentages des pixels bien classés.

2-4-1-9. Vectorisation

La dernière étape pour le traitement des images est la vectorisation. Cela consiste à convertir l'image classifiée de format raster en format vecteur qui est plus facilement manipulable dans un Système d'Information Géographique (SIG). Elle a été faite dans le logiciel Arc Gis 10.3 à travers le module *conversion tools*. Ce module permet de convertir le format raster en format shapfile.

2-4-1-10. Géotraitement

Après avoir produite les cartes d'occupation du sol des années 2000 et 2019, le géotraitement a consisté en une fusion de ses deux cartes à travers l'algorithme « Mapp Algebra » après conversion en format raster à permit de mettre en évidence plusieurs zones : zones stables, les zones dégradées, les zones de reforestation et enfin les zones déforestées. Cela a été réalisé grâce au codage des grandes unités d'occupation obtenues à la fin au niveau des deux années : pour l'année 2000 : non forêts = 0 ; Forêt dégradée = 1 ; Forêt dense = 2. Pour l'année 2019 : non forêt = 0 ; Forêt dégradée = 10 ; Forêt dense = 20. Une addition des deux cartes a permis de produire une carte de mutation de la végétation traduite par de nouveaux codes :

- Zone de forêt stable (forêt dégradée à forêt dégradée) = 1_1 ;
- Zone de forêt stable (forêt dense à forêt dense) = 2_2 ;
- Zone de dégradation forestière (forêt à forêt dégradée) = 2_10 ;
- Zone de reforestation (non forêt à forêt dense) = 0_20 ;
- Zone de reforestation (non forêt à forêt dégradée) = 0_10 ;
- Zone de déforestation (forêt dégradée à non forêt) = 1_0 ;
- Zone de déforestation (forêt dense à non forêt) = 2_0.

2-4-2. Impact de l'occurrence des feux sur la dynamique du couvert végétal

L'évaluation de l'impact est faite à travers la superposition le croisement de la carte de mutation obtenue après géotraitement et celle de l'occurrence des feux (fréquence). Cela est fait à travers les étapes suivantes :

- extraction de différentes tendances : non brûlée, faiblement brûlée, moyennement brûlée et fortement brûlée ;
- superposition et clip sur de la couche de mutation avec celle des tendances ;
- obtention couche des zones qui ont subi différentes mutations en fonction des tendances ;
- réalisation des matrices de transition pour chaque couche ayant subi une tendance enfin de voir la variation des unités d'occupation du sol au sein de la même tendance.

Cette approche a permis de comprendre l'évolution des unités d'occupation en fonction de l'occurrence des feux.

3. Résultats

3-1. Cartographie de la dynamique spatio-temporelle des feux en zone de contact forêt-savane du département de Toumodi

3-1-1. Évolution mensuelle des feux

La saisonnalité du feu a été déterminée à partir du nombre de points de feux et des surfaces brûlées au cours de chaque mois sur la période d'observation de 2001 à 2019. La répartition saisonnière des surfaces brûlées montre que le feu de brousse persiste durant une grande partie de l'année (*Figure 2*). Il en ressort une forte variation des surfaces brûlées mensuellement. La tendance générale montre que la saison du feu du Département de Toumodi s'étale de novembre à février. La saisonnalité est ainsi caractérisée par un démarrage du feu en novembre et se poursuit durant la période sèche avec un accroissement en décembre (35214,59 ha). Elle est plus prononcée en janvier avec 96142,74 ha de superficie sur toute la période d'étude (19 ans). Mais en mars on remarque une diminution (1084,24 ha) Les mois d'avril, mai, juin, juillet, aout, septembre n'ont quasiment pas enregistré de surfaces brûlées.

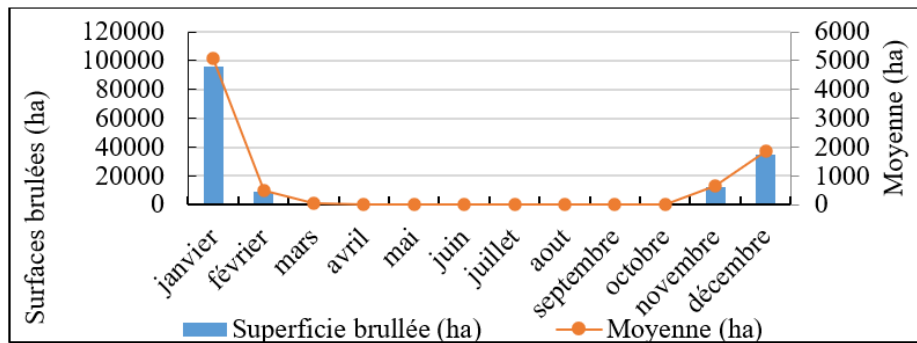


Figure 2 : Variation mensuelle des surfaces brûlées dans le Département de Toumodi de 2001 à 2019

3-1-2. Évolution annuelle des feux

Pour l'évolution des superficies, on note de changement significatif des superficies brûlées chaque année (Figure 3). En général, les surfaces brûlées annuelles ne suivent pas une tendance définie. Il est constaté une diminution de surfaces brûlées en 2001, puis cela a largement augmenté en 2006, mais est redescendu en 2010 et 2014. L'année 2006 a enregistré la plus grande surface brûlée en dix-neuf ans, avec environ 23493,23 ha de surfaces traversées par le feu. Ce qui représente environ 28,94 % de la superficie totale brûlée sur la période soit une moyenne de 1957,77 ha. Les années 2001, 2010, 2017 sont par contre celles qui ont connu moins de dégâts avec respectivement : 1794,35 ; 3725,97, 1189,88 ha traversés par le feu sans oublier 2019 avec moins de superficies brûlées qui pourrait être due aux données manquantes sur certains mois.

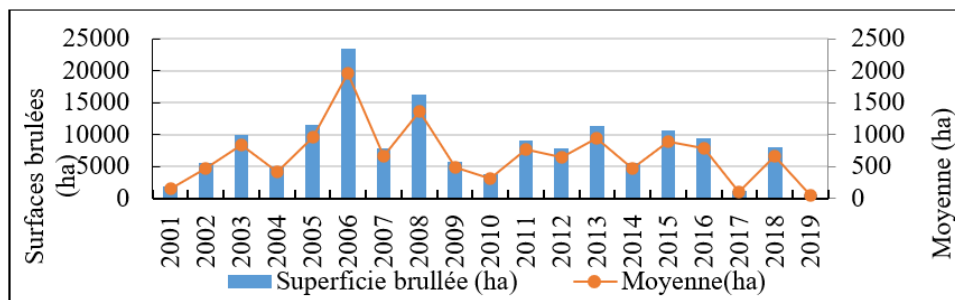


Figure 3 : Évolution annuelle des superficies brûlées dans le Département de Toumodi de 2001 à 2019

3-1-3. Évolution des superficies brûlées

Le traitement des toutes les images de la période 2001-2019 a permis d'avoir des résultats sous forme de cartes (Figure 4) pour chaque mois qui ont été ensuite combinées par année. La compilation de ces résultats a abouti à l'établissement de dix-neuf cartes sur les superficies brûlées. Le suivi de répartition spatiale des superficies brûlées entre 2001 et 2019 indique que chaque année il y a du feu de végétation. Les données MODIS (Burned Areas) des superficies brûlées ont permis de cartographier et d'estimer les superficies brûlées pour la période 2001-2019. Les résultats obtenus indiquent que 154356,21 ha ont été brûlés soit une moyenne de 12863,02 sur toute la période (2001-2019). Ce qui montre l'ampleur de la dégradation de la végétation causée par le feu dans la région la zone d'étude. La localisation des pixels de feux au cours des dix-neuf années montre une répartition du feu sur toute la zone d'étude. D'une façon générale, cette répartition spatiale tient à deux facteurs essentiellement : d'une part les paramètres climatiques, la fragilité des formations végétales (en majorité savane), et les pratiques en matière d'utilisation et de gestion des ressources naturelles.

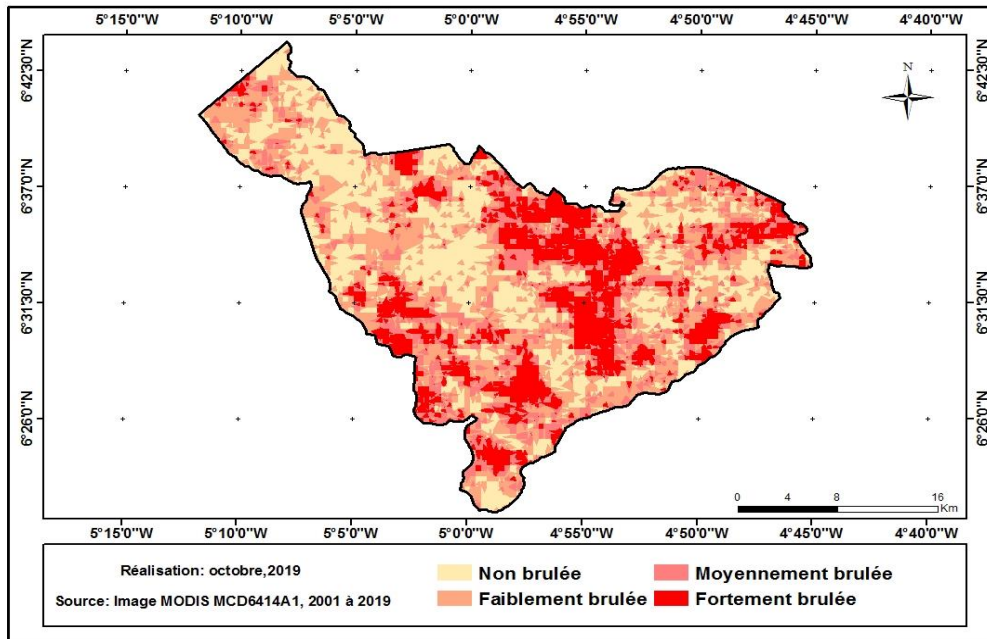


Figure 4 : Carte d'intensité des superficies brûlées entre 2001 à 2019 dans le département de Toumodi

3-1-4. Fréquence et intensité des superficies brûlées entre 2001 à 2019

En ce qui concerne l'intensité des surfaces brûlées (**Figure 4**), elle est évaluée à travers l'occurrence des feux. Cette intensité a été évaluée par la combinaison des données mensuelles des superficies brûlées. Ainsi, sur la période 2001-2019, des superficies ont été brûlées 18 fois avec une moyenne de 4 fois (**Figure 5**). Après catégorisation (**Tableau 1**) en fonction de la moyenne des fréquences, les tendances : non brûlée pour les surfaces qui ne sont pas traversées par le feu, faiblement brûlée pour celles qui sont faiblement traversées, moyennement brûlée pour celles qui l'ont connu moyennement et fortement brûlée pour celle qui sont traversée plus de 4 fois ont été obtenues pour la période.

Tableau 1 : Catégorisation des superficies brûlées en fonction de l'occurrence

Occurrence (2001-2019)	Tendance
0	non brûlée
2	faiblement brûlée
4	moyennement brûlée
> 6	fortement brûlé

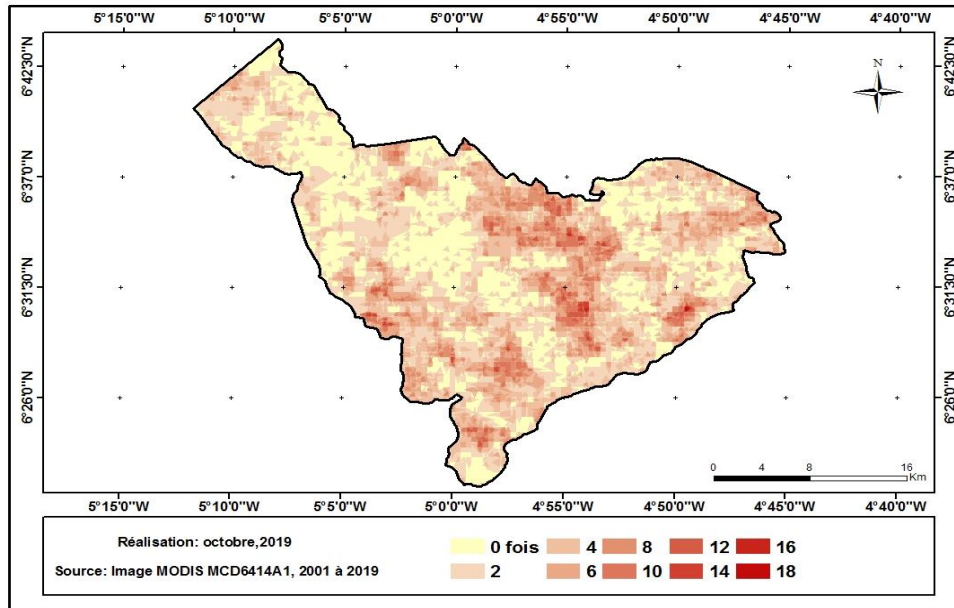


Figure 5 : Carte de l'occurrence du feu entre 2001 à 2019 dans le département de Toumodi

3-2. Évaluation de l'impact de l'occurrence des feux sur la dynamique du couvert végétal dans la zone de contact forêt-savane du département de Toumodi

3-2-1. Dynamique du couvert végétal

De façon générale après classification des images (*Tableau 2*), les unités d'occupation du sol entre l'année 2000 et 2019 (*Figure 6*) montrent une régression des superficies des forêts denses en faveur des forêts dégradées et des "non forêt". Elles occupent les proportions suivantes : "non forêt" (57853,34 ha) soit 71,54 %, forêt dense (9570,57 ha) soit 11,83 % et forêt dégradée (13444,63 ha) soit 16,63 % tandis qu'en 2019, elles sont devenues respectivement 60303,22 ha soit 74,57 % ; 5958,93 ha soit 7,37 % et 14606,41 ha soit 18,06 % (*Tableau 3*).

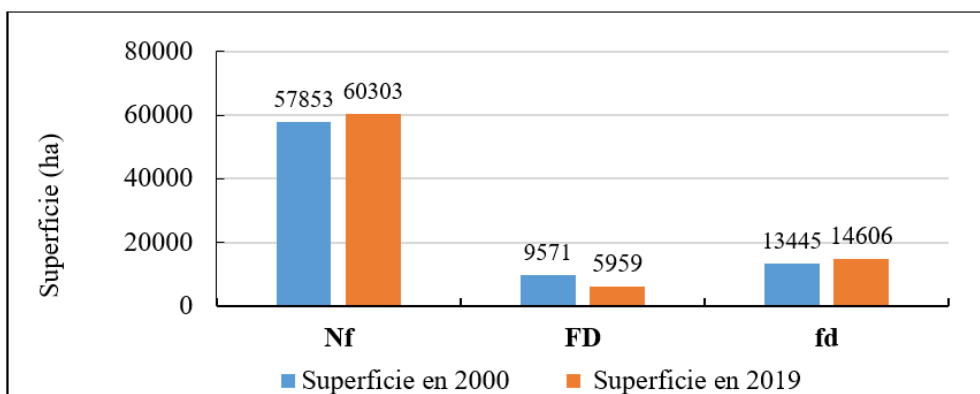


Figure 6 : Superficies des unités d'occupation du sol des années 2000 et 2019
Légende : Nf : Non forêt ; FD : Forêt dense ; fd : Forêt dégradée

Tableau 2 : Variations des superficies des unités d'occupation des années 2000 et 2019

Unité d'occupation du sol	Année 2000	
	Superficie (ha)	Proportion (%)
Non forêt	57853,34	71,54
Forêt dense	9570,57	11,83
Forêt dégradée	13444,63	16,63
Total 2000	80868,56	100
Année 2019		
Non forêt	60303,22	74,57
Forêt dense	5958,93	7,37
Forêt dégradée	14606,41	18,06
Total 2019	80868,56	100

3-2-2. Mutation des unités d'occupation du sol

Le Département de Toumodi de 2000 à 2019 a connu une mutation au niveau du couvert végétal (*Tableau 4*). Elle a pour conséquence, des gains, des pertes et des stabilités de la végétation (*Figure 8*). En effet, certaines unités d'occupation ont connu des gains (reforestation) d'une superficie de 3596,63 ha ; des pertes (déforestation) de 11695,68 ha avec des unités stables (forêts, forêts dégradées) respectivement avec 2284,57 ha et 2941,58 ha. Les gains et pertes sont issus des reconversions de certaines unités d'occupation en d'autres telles que la forêt dense et/ou la forêt dégradée en "non forêt" vice versa, la forêt dense en forêt dégradée et enfin les "non forêt" en forêt dense et/ou forêt dégradée.

3-2-2-1. Matrice de transition des formations végétales de 2000 à 2019

L'examen de la matrice permet de retenir trois (3) classes d'occupation du sol au niveau des deux années. La dynamique des formations végétales entre 2000 et 2019 est synthétisée à travers la matrice de transition (*Tableau 5*). Dans les cellules des lignes se trouvent les différentes unités. Les conversions se font des colonnes vers les lignes. Les cellules de la diagonale correspondent aux unités stables de 2000 à 2019. Les unités qui sont en dehors de la diagonale représentent les changements des unités d'occupation du sol.

3-2-2-1-1. Évolution des « non forêts »

Les « non forêts » ont connu une augmentation de leur superficie entre 2000 et 2019. Leur superficie est passée de 58730,45 ha (2000) à 61218,98 ha (2019) soit un pourcentage de 75,81 %. D'après ces données il dénote que les superficies ont connu des gains à travers la conversion des forêts denses (3,80 %) et forêts dégradées (11,50 %) sans oublier une stabilité de 84,70 %.

3-2-2-1-2. Évolution des forêts denses

De 2000 (9207,58 ha) à 2019 (5681,15 ha), la superficie des forêts denses a connu une régression de 3526,43 soit un taux de 0,83 %. La matrice de transition révèle que les forêts denses sont converties en forêt dégradée (45,71 %), en "non forêt" (30,43 %) et une stabilité de 23,88 %.

3-2-2-1-3. Évolution des forêts dégradées

De 12817,67 ha en 2000, elles sont passées à 13855,57 ha (2019) soit 17,16 %. Les forêts dégradées selon la matrice ont connu des gains venant des "non forêt" (67,68 %) et des forêts denses (9,78 %). Toutefois elles ont connu une stabilité de 22,54 %.

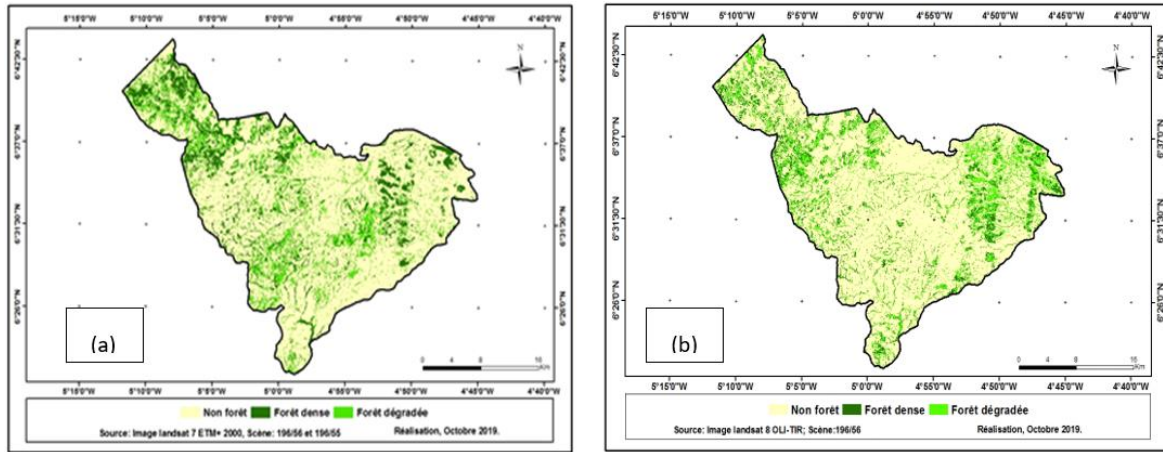


Figure 7 : Carte d'occupation du sol du Département de Toumodi
NB : (a) = Année 2000 ; (b) = Année 2019

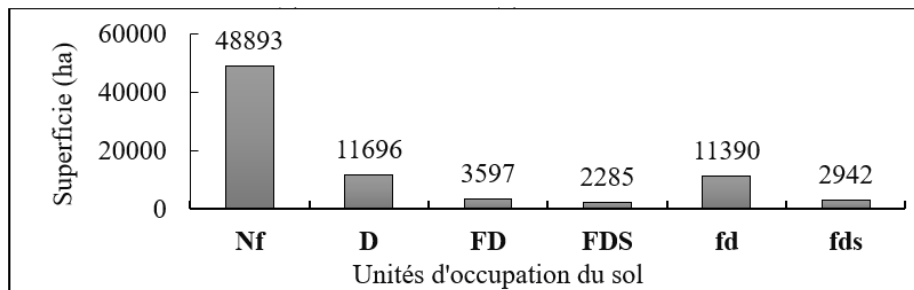


Figure 8 : Mutation des unités d'occupation du sol entre 2000 et 2019

Légende : Nf : Non forêt ; D : déforestation ; FD : forêt dense ; FDS : Forêt dense stable ; fd : forêt dégradée ; fds : forêt dégradée stable

Tableau 3 : Bilan des matrices de confusion et du coefficient Kappa

Année	Précision globale (%)	Coefficient Kappa
2000	85,82	0,8
2019	83,44	0,81

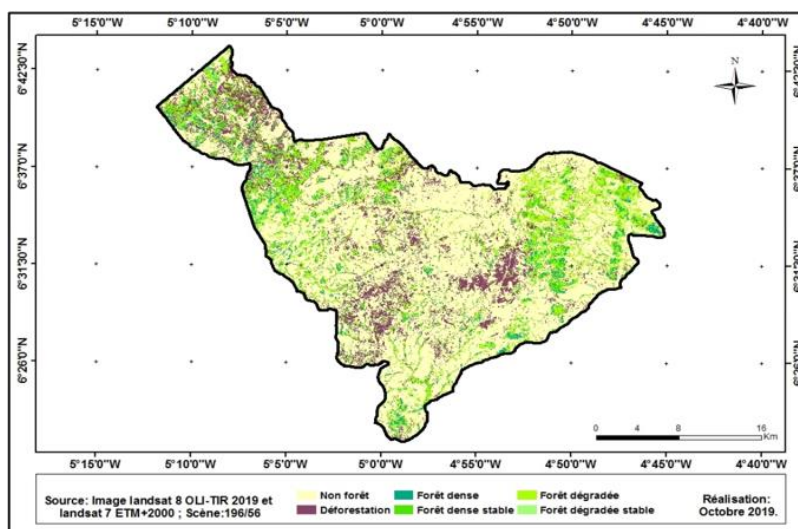


Figure 9 : Carte synthèse des mutations des unités d'occupation du sol entre 2000 et 2019

Tableau 4 : Mutation des unités d'occupation du sol entre 2000 et 2019

Mutation des superficies de 2000 à 2019 (ha)	
Non forêt	48892,71
déforestation	11695,68
forêt dense	3596,63
Forêt dense stable	2284,57
forêt dégradée	11390,04
Forêt dégradée stable	2941,58

Tableau 5 : Matrice de transition des formations végétales de 2000 à 2019 en hectare (ha) et en pourcentage (%)

		Superficie en 2000 (ha)				
		Classes	Nf	FD	fd	Total 2019
Superficie en 2019 (ha)	Nf		49744,63	2799,83	8674,52	61218,98
	FD		2229,07	2198,65	1253,44	5681,15
	fd		6756,75	4209,11	2889,71	13855,57
	Total 2000		58730,45	9207,58	12817,67	80755,70
		Superficie en 2000 (%)				
		Classes	Nf	FD	fd	Total 2019
Superficie en 2019 (%)	Nf		84,70	30,41	67,68	75,81
	FD		3,80	23,88	9,78	7,03
	fd		11,50	45,71	22,54	17,16
	Total 2000		100,00	100,00	100,00	100,00

Légende : Nf : Non forêt ; FD : Forêt dense ; fd : Forêt dégradée

3-2-3. Impact de l'occurrence des feux sur la dynamique du couvert végétal

En général, on remarque que les superficies brûlées durant la période d'étude sont considérables. Par rapport aux superficies brûlées en fonction des tendances sur la période 2001-2019 (*Figure 10*), il ressort que les surfaces non brûlées et faiblement brûlées occupent respectivement les superficies suivantes : 23957,76 ha (29,51 %) et 24341,11 ha (29,98 %) tandis que 15894,60 ha sont moyennement brûlées et 16993,45 ha sont fortement brûlées, occupant respectivement, 19,58 % et 20,93 %. En ce qui concerne les mutations survenues (*Figure 11*), il en ressort que les unités qui ont subi la déforestation sont les plus touchées par de fortes tendances du feu, suivi des unités dégradées (forêt dégradée). Ces zones de mutation ont enregistré des grandes superficies brûlées par rapport aux autres. Pour les unités ayant subi la déforestation, en fonction des tendances des feux, ils ont enregistré successivement, 6732,88 ha de surfaces non brûlées, 7557,79 ha faiblement brûlées 5952,28 ha moyennement brûlées et 4477,06 ha fortement brûlée. Quant aux unités forêts dégradées, en fonction de la tendance, elles ont pour leurs parts enregistrés successivement : 10604,58 ha de surfaces non brûlées, 11818,63 ha faiblement brûlées, 10384,09 ha moyennement brûlées, et 8016,42 ha fortement brûlée.

3-2-4. Dynamique des formations végétales entre 2000 et 2019 après le passage du feu

3-2-4-1. Superficies faiblement brûlées

La matrice des superficies faiblement brûlées fait état sur le changement intervenu au sein des unités faiblement brûlées par le feu.

3-2-4-1-1. Évolution des « non forêts »

Les « non forêts » pour leur part sont passées de 52309,4 ha en 2000 à 53474,7 en 2019. Cette transformation a connu des mutations à travers la conversion de 2,3 % de ces superficies en forêts denses et 7,8 % en forêt dégradée avec une stabilité de 90,0 %.

3-2-4-1-2. Évolution des forêts denses

De 2000 (5628,8 ha) à 2019 (3056,8 ha), la superficie des forêts denses a connu une régression de 4332,4 ha soit un taux de 77 %. La matrice révèle que les forêts denses sont converties en forêts dégradées (46,4 %), en "non forêts" (30,6 %) avec une stabilité de 23,0 %.

3-2-4-1-3. Évolution des forêts dégradées

Passées de 6522,6 ha (2000), à 7929,2 ha (2019), les forêts dégradées d'après la matrice ont connu des gains venant des "non forêts" (7,8 %) et des forêts denses (46,4 %) et des pertes en faveur des forêts denses (8,7 %) et au aussi des "non forêts" (72 %). Elles ont connu aussi une stabilité de 19,3 %.

3-2-4-2. Superficies moyennement brûlées

La matrice des superficies moyennement brûlées (Annexe 8), montre les changements intervenus au sein des unités moyennement brûlées par le feu.

3-2-4-2-1. Évolution des « non forêt »

Les « non forêts » pour leur part sont passées de 49330,3 ha en 2000 à 50640,8 en 2019. Cette transformation a connu des mutations à travers la conversion de 1,6 % de ces superficies en forêts denses et 5,7 % en forêts dégradées avec une stabilité de 90,0 %.

3-2-4-2-2. Évolution des forêts denses

De 2000 (3704,3 ha) à 2019 (1920,1 ha), la superficie des forêts denses a connu une régression de 1784,2 ha soit un taux de 78,4 %. La matrice révèle que les forêts denses sont ainsi converties en forêts dégradées (49,1 %), en "non forêts" (29,3 %) avec une stabilité de 21,6 %.

3-2-4-2-3. Évolution des forêts dégradées

Passées de 4931,0 ha (2000), à 5404,7 ha (2019), les forêts dégradées ont connu des gains venant des "non forêts" (5,7 %) et des forêts denses (49,1 %) et des pertes en faveur des forêts denses (6,3 %) et au aussi des "non forêt" (78,2 %). Elles ont connu une stabilité de 15,5 %.

3-2-4-3. Superficies fortement brûlées

La matrice (Annexe 9) montre les changements intervenus au sein des unités fortement brûlées par le feu.

3-2-4-3-1. Évolution des « non forêts »

Les "non forêts" en ce qui concerne les superficies fortement brûlées, sont passées de 46576,7 ha (2000) à 50640,8 (48248,3). Cette transformation a connu des mutations à travers la conversion de 1,2 % de ces superficies en forêts denses et 3,8 % en forêt dégradée avec une stabilité de 95 %.

3-2-4-3-2. Évolution des forêts denses

De 2000 (2323,0 ha) à 2019 (1200,9 ha), la superficie des forêts denses a connu une régression de 1122,1 ha soit un taux de 80 %. La matrice révèle que les forêts denses sont converties en forêts dégradées (50,3 %), en "non forêts" (29,7 %) avec une stabilité de 20 %.

3-2-4-3-3. Évolution des forêts dégradées

Passées de 3959,2 ha (2000), à 3409,7 ha (2019), les forêts dégradées ont connu des gains venant des "non forêts" (3,8 %) et des forêts denses (50,3 %) et des pertes en faveur des forêts denses (4,8 %) et au aussi des "non forêts" (83,4 %). Elles ont connu une stabilité de 11,8 %.

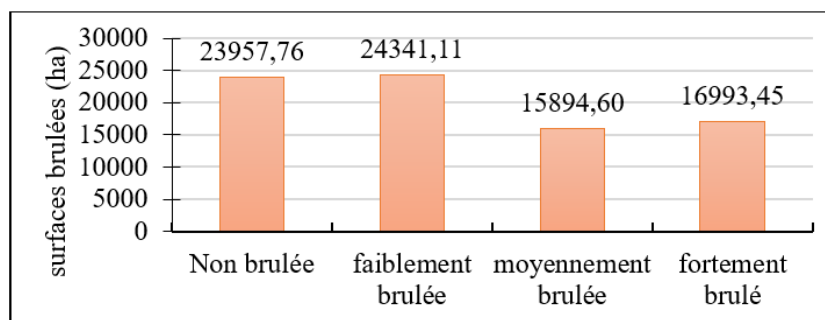


Figure 10 : Superficies brûlées en fonction des tendances entre 2001 et 2019

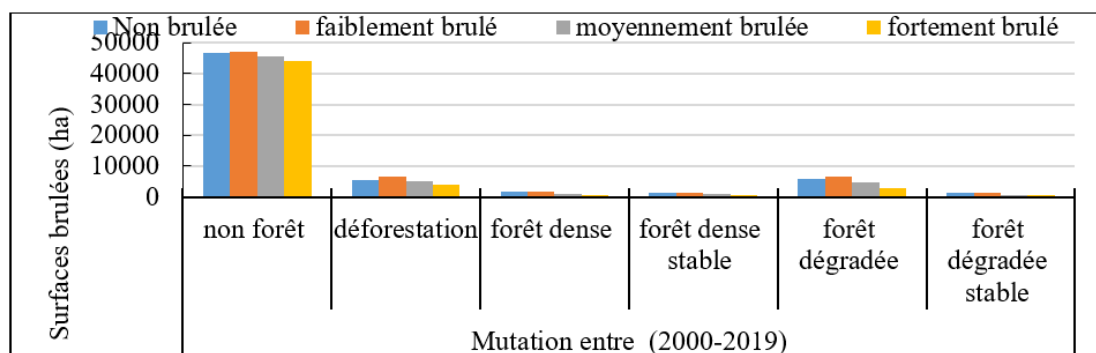


Figure 11 : Superficies des mutations brûlées en fonction des tendances entre 2001 et 2019

4. Discussion

4-1. Dynamique spatio-temporelle de la végétation

Les résultats issus de la classification ont permis de catégoriser les unités d'occupation du sol en trois grandes unités : non forêt, forêt dense et forêt dégradée. Les précisions obtenues au cours des traitements varient entre 83,4 et 85,8 %. Ces derniers sont proches de celles obtenues par certains auteurs en zone de savane [33, 34]. Dans cette étude, les résultats ont montré que de 2000 à 2019, les unités forestières (forêt dense et forêt dégradée) ont globalement connu des régressions tandis que les autres unités non forestières constituées des savanes, des plantations, des jachères, des zones de cultures ont vu leurs superficies augmentées. Cette situation pourrait s'expliquer par le passage répété du feu (fréquence). En effet, les feux fragilisent les essences et réduisent leur capacité de régénéscence. La modification spatiale de ces grandes unités est plus ressentie dans les zones forestières où l'action anthropique est plus ressentie. Ces zones

forestières généralement dominées par l'agriculture sur brulis est l'une des causes de sa dégradation. Mais d'après les recherches de [35] la savane se transforme en forêt en ce qui concerne la dynamique de la végétation dans le «V-Baoulé». Ce qui n'est pas prouvé dans la présente étude. En effet il est remarqué que les conversions des unités d'occupations ne se font pas en sens unique, car selon nos résultats, les mutations sont remarquées au niveau de chaque unité d'occupation du sol, (forêts dégradées, forêts denses et « non forêts »).

4-2. Impact du feu sur la dynamique du couvert végétal.

Les résultats de cette étude ont montré que sur la période d'étude (2001-2019) chaque année, d'importantes superficies de terre brûlent. De même, on note que toutes les unités d'occupation sont parcourues chaque année par les feux, mais à de fréquences diverses. Il est remarqué aussi que certaines années (2006, 2008, 2013) sont plus marquées par le phénomène des feux de brousse. Il est à souligner que les zones dégradées sont les plus exposées aux feux. Cela se confirme par le fait que les zones qui ont connu la déforestation sont les zones où l'occurrence est forte. Ces zones qui en 2000 étaient relativement plus denses (forêts denses) se sont retrouvées en état dégradé en 2019. En effet, certaines unités d'occupation qui ont connu de forte occurrence n'ont pas véritablement subi de changement tandis que d'autre par contre quand bien même l'ont subi, sont moins dégradées. Ces mutations pourraient non seulement être dues au passage du feu, mais aussi à des actions anthropiques récurrentes dans la zone d'étude telles que : l'agriculture, l'urbanisation. Mais les résultats ont prouvé de façon générale que les superficies des forêts dégradées augmentent en fonction de l'occurrence des feux. Cette dégradation serait due à l'inhibition de bourgeons et semences des essences forestières, ce qui empêcherait leur régénérescence. Cette hypothèse est aussi avancée par [36] concernant l'action du feu sur les ressources forestières dans le « V-Baoulé ». La dégradation de certaines zones denses en 2000 devenues dégradées ou transformées en zone « non forêts » pourrait être causée par la dégradation du sol sous l'effet de la fréquence du feu. La dégradation des conditions édaphiques fera disparaître certaines espèces. Cette hypothèse est confirmée par les travaux de [37] qui indique que les feux modifient la composition des sols par une augmentation de leur teneur en potassium.

L'impact du feu sur la dynamique du couvert végétal et plus précisément en zone de contact forêt-savane ne devrait pas être pris de façon isolée. Les feux sont issus des actions de l'homme, facteurs premiers favorisant l'éclosion du feu dans les régions de savane. Cette affirmation est aussi faite par [36]. Après l'analyse croisée de la distribution des superficies brûlées et des unités d'occupation du sol, il en ressort que les surfaces à forte occurrence sont les zones de déforestation et de dégradation. Les feux sont plus remarqués dans les unités « non forêts » et forêts dégradées constituant en majorité des savanes, formations végétales ouvertes, donc plus exposées aux feux. Ces résultats se rapprochent de ceux obtenus par [38] qui a noté qu'au Botswana, les savanes sont les plus exposées aux feux et que les forêts sont peu concernées. Cela montre que la nature de la formation végétale et son occupation de sol sont déterminantes dans l'évaluation du niveau d'exposition et de vulnérabilité d'un écosystème au risque de feu [39]. De même, le fait que l'unité « non forêt » a enregistré généralement plus de surfaces brûlées pourrait s'expliquer par le fait que composée en majorité par les savanes, elles constituent des combustibles herbacés facilement inflammables tandis que les formations denses sont surtout composées des combustibles lourds qui requièrent de l'énergie excessive pour s'enflammer. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par [40] dans ses études faites sur le suivi du feu et son impact sur la végétation dans les corridors forestiers à Madagascar. D'après [41] sur une durée de 2 à 4 ans après un feu, l'écosystème reconstitue ses ressources végétales annulant pratiquement l'effet du feu antérieur. Cette situation est contraire à notre résultat, car de façon générale, on constate une dégradation progressive du couvert végétal en fonction de l'occurrence du feu qui est pratiquement présent chaque année.

5. Conclusion

La présente étude sur la dynamique spatio-temporelle des feux de 2001 à 2019 et dégradation du couvert végétal en zone de contact forêt-savane (département de Toumodi) au centre de la Côte d'Ivoire, s'inscrit dans un contexte global qui est de contribuer à la connaissance sur la récurrence des feux et son impact sur les écosystèmes forestiers pour une gestion durable. Nous pouvons retenir au terme de la présente étude que les unités d'occupation du sol qui ont subi une forte occurrence du feu sont les zones où la déforestation a été observée d'une part, et les zones dégradées d'autre part. Ainsi, on peut conclure que l'occurrence des feux contribue à la dynamique du couvert végétal dans la zone d'étude. Le couvert végétal de la zone d'étude subit une dégradation progressive avec des superficies brûlées de plus en plus considérables engendrant une dynamique spatio-temporelle. Cette dynamique montre de façon globale que les forêts denses se transforment en forêt dégradée et que les « non forêt » dominées par les savanes pour leur part gagnent en superficie.

Références

- [1] - A. THIOMBIANO, M. SCHMIDT, H. KREFT and S. GUINKO, "Influence du gradient climatique sur la distribution des espèces de Combretaceae au Burkina-Faso (Afrique de l'Ouest)". *Candollea*, 61 (2006) 189 - 213
- [2] - FAO, "Global Forest Resources Assessment 2020", FRA 2020 Main report. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>
- [3] - GFMC, "Les incendies dans le monde : Message du Global Fire Monitoring Center", (2008) 22 p.
- [4] - R. G. UYS, W. BOND and T. M. EVERSON, "The effect of different fire regimes on plant diversity in southern African grasslands", *Biological Conservation*, Vol. 118, 4 (2004) 489 - 499 p. DOI : 10.1016/j.biocon.2003.09.024
- [5] - L. SAWADOGO, L'influence des feux sur la biodiversité des savanes ouest africaines, Atlas de la Biodiversité de l'Afrique de l'Ouest, Côte d'Ivoire, Tome III, BIOTA, (2011) 72 - 73 p.
- [6] - R. J. WHELAN, "The Ecology of Fire". Cambridge University Press, (1995)
- [7] - SCMFDF, Stratégie canadienne en matière de feux de forêt : vision pour une approche innovatrice et intégrée pour la gestion des risques, (2005) 25 p.
- [8] - M. HOUINATO, B. SINSIN and J. LEJOLY, "Impacts of bush fires on plant community dynamics in the Bassila forest (Benin)", *Acta botanica Gallica-bulletin* de la Société botanique de France, 148 (3) (2013) 237 - 251
- [9] - F. BACELAR, S. JUSTIN, M. CALABRESE and E. HERNANDEZ-GARCIA, "Exploring the tug of war between positive and negative interactions among savanna trees : competition, dispersal, and protection from fire, *Ecological Complexity*, 17 (2014) 140 - 148 p. DOI: 10.1016/j.ecocom.2013.11.007
- [10] - F. VALEA and A. BALLOUCHE, "Bush fires in West Africa : environmental constraints or environmental management tool?" The example of Burkina Faso. *Territoires d'Afrique*, Vol. 3, (2012) 36 - 47 p.
- [11] - Y. KONKO, B. AFELU and K. KOKOU, "Potentialité des données satellitaires Sentinel-2 pour la cartographie de l'impact des feux de végétation en Afrique tropicale : application au Togo", *Bois et Forêts des Tropiques*, 347 (2021) 59 - 73 DOI: doi.org/10.19182/bft2021.347.a36349
- [12] - J. S. LEVINE, "Biomass burning and the production of greenhouse gases In *Climate Biosphere Interaction : Biogenic Emissions and Environmental Effects of Climate Change*". Zepp, R.G., Ed.; John Wiley and Sons: New York, (1994) 139 - 160 p.
- [13] - R. A. LOEHMAN, E. REINHARDT and K. L. RILEY, "Wildland fire emissions, carbon, and climate : Seeing the forest and the trees - A cross-scale assessment of wildfire and carbon dynamics in fire-prone,

- forested ecosystems". *Forest Ecology and Management*, 317 (2014) 9 - 19. doi: 10.1016/j.foreco.2013.04.014
- [14] - J. G. GOLDAMMER, "Les incendies dans le monde : Message du Global Fire Monitoring Center; Global Fire Monitoring Center (GFMC)": Freiburg, Germany, (2000)
- [15] - K. L. DENMAN, G. BRASSEUR, A. CHIDTHAISONG, P. CIAIS, P. M. COX, R. E. DICKINSON, D. HAUGLUSTAINE, C. HEINZE, E. HOLLAND, D. JACOB, U. LOHMANN, S. RAMACHANDRAN, P. L. DA SILVA DIAS, S. C. WOFYSY, and X. ZHANG, "Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry In Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (2007) 499 - 587 p.
- [16] - A. B. N'DRI, J. GIGNOUX, A. DEMBELE and S. KONATE, "Short term effects of fire intensity and fire regime on vegetation dynamic in a tropical humid savanna (Lamto, central Côte d'Ivoire) ". *Natural Science*, 04 (12) (2012) 1056 - 1064. doi: 10.4236/ns.2012.412134
- [17] - S. H. DOERR and C. SANTIN, "Global trends in wildfire and its impacts : perceptions versus realities in a changing world". *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*. (2016), 371 (1696), doi :10.19044/esj.2016.v12n18p14
- [18] - M. A. COCHRANE, "Fire in the tropics In Tropical Fire Ecology". Doi : 10.1007/978-3-540-77381-8_1; Cochrane, M.A., Ed.; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, UK, (2009) 1 - 23 p.
- [19] - M. OTSUKA, M. RAZAFIMAHATRATRA and O. ANDRIANANDRASANA, "Manuel sur la lutte contre les feux de végétation : Compilation du savoir-faire actuel"; Ministère de l'Environnement, des Eaux et Forêts & Agence japonaise de Coopération Internationale : Antananarivo, Madagascar, (2003)
- [20] - FAO, "Evaluation des ressources forestières mondiales 2000". Rome, Italie, FAO, Étude Forêts, N° 140 (2001) 181 p.
- [21] - SODEFOR, "Gestion et prévention des incendies de forêt en Côte d'Ivoire" (IFFN n° 20 - mars 1999), (1999) 50 - 56 p.
- [22] - A. B. N'DRI, T. D. SORO, J. GIGNOUX, K. DOSSO, M. KONE, J. K. N'DRI, N. A. KONE and S. BAROT, "Season affects fire behavior in annually burned humid savanna of West Africa. *Fire Ecology*"., 14 (2) (2018) 5. doi: 10.1186/s42408-018-0005-9
- [23] - A. JACQUIN, "Dynamique de la végétation des savanes en lien avec l'usage des feux à Madagascar. Analyse par série temporelle d'images de télédétection". Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, (2010) 146 p.
- [24] - L. GIGLIO, L. BOSCHETTI, D. ROY, A. A. HOFFMANN and M. M. HUMBER, "Collection 6 MODIS Burned Area Product User's Guide Version 1.3", (2020) 26 p.
- [25] - D. P. ROY, Y. JIN, P. E. LEWIS & C. O. JUSTICE, "Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data". *Remote sensing of environment*, 97 (2005) 137 - 162 p.
- [26] - L. BOSCHETTI, D. ROY & A. HOFFMANN, "MODIS Collection 5 Burned Area Product MCD45, User's Guide Version 2.0", (2009)
- [27] - B. W. ECKHARDT and T. R. MOORE, "Controls on dissolved organic carbon concentrations in streams, southern Quebec". *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 47 (1990) 1537 - 1544
- [28] - RAHMAN and DEDIEU, "SMAC : une méthode simplifiée pour la correction atmosphérique des mesures satellites dans le spectre solaire", *Journal international de télédétection*, Vol. 15, N°1 (1994), doi.org/10.1080/01431169408954055

- [29] - J. W. ROUSE, R. H. HAAS, D. W. DEERING, J. A. SCHELL and J. C. HARLAN, "Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation". In NASA (Ed.), Type III Final Report. Greenbelt, MD : NASA/GSFC, (1974)
- [30] - E. P. CRIST and R. C. CIGONE, Application of the Tasseled Cap Concept to Simulated Thematic Mapper Data, Environmental Research Institute of Michigan Ann Arbor, MI 48107, (1984) 10 p.
- [31] - C. N. BOUHOSSOU, "Contribution de l'image Spot 6 à la caractérisation et à la cartographie des écosystèmes de mangrove dans la zone du Sud-Est du Parc National d'Azangny (site RAMSAR)". Master 2 de l'Université de Cocody-Abidjan (Université Félix Houphouët-Boigny), Abidjan, Côte d'Ivoire, (2017) 66 p.
- [32] - G. SKUPINSKI, D. BINHTRAN and C. WEBER, Les images satellites Spot multi-dates et la métrique spatiale dans l'étude du changement urbain et suburbain - Le cas de la basse vallée de la Bruche (Bas-Rhin, France), Cybergeog : *European Journal of Geography*, article, N°439 (2009), DOI : 10.4000/cybergeog.21995
- [33] - H. D. N'DA, K. E. N'GUESSAN, E. M. WADDJA and K. AFFIAN, "Apport de la télédétection au suivi de la déforestation dans le Parc National de la Marahoué (Côte d'Ivoire)". *Télédétection*, 8 (1) (2008) 17 - 34
- [34] - F. ACHARD and F. BLASCO, "Rythmes saisonniers de la végétation en Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale. In P. Lafrance et J. M. Dubois. Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse". Collection Universités francophones Editions AUPELF- UREF et John Libbey Eurotext, Paris, (1990) 1 - 15 p.
- [35] - J. L. DEVINEAU, "Structure et dynamique de quelques forêts tropicales de l'Ouest africain (Côte d'Ivoire)". Doctorat, Pierre et Marie Curie, Paris VI, France, (1984) 303 p.
- [36] - D. H. N'DA, "Contribution de la télédétection et des SIG à l'étude du changement climatique et leur interaction sur la dynamique des forêts en Côte d'Ivoire : Cas du V Baoulé", Rapport d'études, OIBT, (2012) 70 p.
- [37] - R. SILLANS, "Les savanes de l'Afrique centrale". Paul Chevalier, Paris (France), (1959) 433 p.
- [38] - P. D. OPHA, Linking fire and climate : interactions with land use, vegetation, and soil, Current Opinion in *Environmental Sustainability*, 1 (2) (2009) 161 - 169 p.
- [39] - I. PALUMBO, J-M. GREGOIRE, D. SIMONETTI and M. PUNGA, "Spatio-temporal distribution of fire activity in protected areas of Sub-Saharan Africa derived from MODIS data". *Procedia Environmental Sciences*, 7 (2011) 26 - 31
- [40] - H. E. RANDRIANASOLO, "Suivi de l'évolution du feu dans le corridor forestier Ranomafana-Andringitra-Ivohibe et son impact sur la végétation : cas de Namoly". Mémoire de DEA. Université d'Antananarivo. Madagascar, (2013) 72 p.
- [41] - B. AFELU, K. A. DJONGON and K. KOKOU, "Dynamique spatiotemporelle des feux de végétation au Togo (Afrique de l'Ouest)". *European Scientific Journal*, 12 (18) (2016) 14 - 23 p.