

ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DE L'OCCUPATION DU SOL PAR TELEDETECTION DANS UNE ZONE HUMIDE SAHELIEUNE : CAS DU LAC FITRI (TCHAD), 2002-2022

Angeline KEMSOL NAGORNGAR¹

Christine RAIMOND²

Djim-assal DATOLOUM¹

Tashi YALIKUN²

¹Centre National de Recherche pour le Développement. BP 1228 N'Djamena (Tchad). E.mail : akemsol@gmail.com

²CNRS - UMR 8586 PRODIG - Université Paris1

Résumé

Le lac Fitri, situé au cœur du Tchad, fait partie des zones humides d'attraction, suite aux crises climatiques et sécuritaires qu'ont traversées les pays sahéliens. Cette étude a été initiée pour évaluer la dynamique de l'occupation du sol sur 20 ans allant de 2002 à 2022 en utilisant les images satellitaires Landsat et Sentinel-2. La complexité du milieu a conduit à l'utilisation de la classification dirigée par Maximum de Vraisemblance suivie de la digitalisation pour extraire les zones de cultures de décrue en se servant des points GPS relevés sur le terrain. Le choix de cette méthode garantit la restitution des éléments d'un milieu humide fragmenté où les différentes unités d'occupation du sol s'imbriquent fortement les unes dans les autres. En termes de dynamique, l'étude révèle que l'environnement naturel a subi une dégradation plus importante en sept ans, entre 2015 et 2022, qu'en treize ans, entre 2002 et 2015. La forêt a enregistré un taux annuel moyen d'expansion spatiale de -8,79 %. Parallèlement, les surfaces cultivées et les plans d'eau ont progressé de manière constante au cours des vingt années considérées. Les taux annuels moyens sont de 3 % pour les cultures de décrue, de 0,88 % pour les cultures pluviales et de 0,91 % pour les plans d'eau. Ces résultats révèlent un milieu naturel dégradé estimé à 34% mais des zones de cultures et plans d'eau en augmentation respective de 27% et 211% sur les 20 années considérées.

Mots-clés : Zone humide, Sahel, Occupation du sol, Télédétection, Dynamique spatiale, Classification supervisée, Lac Fitri, Tchad.

Abstract

Wetlands in the Sahel play a very important role in sustaining both human and animal life. Lake Fitri, located in the heart of Chad, is one of these areas of attraction, following the climate and security crises that have affected the Sahelian countries. This attraction is creating pressures that will need to be monitored in order to limit the degradation of the area's natural resources. This study was initiated to assess land use dynamics over a 20-year period from 2002 to 2022 using Landsat and Sentinel-2 satellite images. The complexity of the environment led to the use of two methods of processing remote sensing images to map the different landscape units of the Fitri. These are Maximum Likelihood classification followed by digitisation to extract the areas of floodplain crops using GPS points collected in the field. In terms of dynamics, the study reveals that the natural environment has suffered more degradation in seven years, between 2015 and 2022, than in 13 years, between 2002 and 2015. The forest has recorded an average annual rate of spatial expansion of -8.79%. Meanwhile, crop areas and water bodies have been steadily increasing over the 20 years considered. The average annual rates are 3% for floodplain crops, 0.88% for rain-fed crops and 0.91% for water bodies. These results reveal a degraded natural environment estimated at 34%, but areas of cultivation and bodies of water have increased by 27% and 211% respectively over the 20 years considered.

Keywords: *Wetland, Sahel, Land use, Remote sensing, Spatial dynamics, Supervised classification, Lake Fitri, Chad*

1. Introduction

Les zones humides sont vitales car c'est le lieu où se rencontre une diversité écologique importante aussi bien du point de vue animale que végétale (Clément *et al.*, 2008). Elles jouent un rôle considérable en zone sahélienne, pour de nombreux services écosystémiques qu'elles fournissent tant aux sociétés rurales riveraines qu'à celles qui utilisent saisonnièrement ces ressources sous forme de fourrage et de bois de chauffe. Souvent caractérisées par une topographie très plane, les microreliefs déterminent la répartition de l'eau et de la couverture herbacée et arborée, formant un paysage complexe où se juxtaposent des formations végétales très diversifiées. Ces formations restent plus ou moins longtemps inondées et s'assèchent progressivement au cours de la décrue et de la saison sèche. La variabilité structurelle du climat sahélien a des conséquences

directes sur l'extension des crues (Descroix *et al.*, 2013) et sur les conditions d'hydromorphie, de régénération et de dégradation de la végétation. Elle alterne saisons sèches et pluviales plus ou moins longues et abondantes, mais aussi des périodes plus ou moins sèches (Lemoalle et Magrin, 2014). En parallèle, l'augmentation des activités humaines liée à la pression démographique et à l'expansion des surfaces cultivées et pâturées au lac Fitri, complexifie l'évaluation des dynamiques paysagères (Raimond *et al.*, 2019). Dans ce contexte, il est essentiel de quantifier et localiser les processus de régénération et de dégradation végétale pour orienter des stratégies de gestion durable des zones humides sahéliennes en général, et du lac Fitri en particulier.

L'objectif de la présente étude est d'envisager, pour une zone humide au Tchad, une méthodologie en télédétection spatiale à grande échelle pour réaliser des classifications à plusieurs dates puis une analyse

diachronique évaluant les processus de régénération/dégradation de la végétation depuis 2002. Cette période correspond en effet à une phase de reprise de la pluviométrie alors que la croissance démographique s'accélère, et donc à une phase de changements paysagers importants (Raimond *et al.* 2019). Le choix du lac Fitri, au Sahel central au Tchad, se justifie par les activités de recherche d'une équipe pluridisciplinaire qui suit depuis 2015 pour ce lac¹ les variations hydrologiques, climatiques, des systèmes d'activité et de l'occupation du sol. L'ensemble de ces observations et analyses permet de croiser les résultats de la télédétection avec les réalités terrain.

Classé zone humide d'importance internationale par la convention Ramsar depuis 1990 et Réserve de biosphère nationale (Décret N°773/PR/MTE/89), le lac est toutefois soumis à une dégradation croissante en raison des activités anthropiques (BEGC, 2016). En même temps, cet espace situé au sud-ouest de la province du Batha, fait partie des zones rurales à fortes potentialités économiques du pays.

Avec une profondeur moyenne de quelques mètres et une superficie inondée variant de 400 à plus de 1000 km² selon les années et les saisons (Yalikun *et al.*, 2019), le Fitri est un lac endoréique alimenté par la crue de la rivière Batha, dont le bassin versant est entièrement situé en zone sahélienne et non aménagé. Il s'insère dans une matrice steppique caractérisée par un tapis graminéen annuel et une couverture ligneuse arbustive éparsée et parfois rabougrie. Le lac définit une zone plus humide où se déploie une savane plus ou moins arborée à épineux et Combrétacées (Pias et Poisot, 1965).

Depuis l'eau libre au centre, le paysage s'organise en auréoles : d'abord la prairie marécageuse sur les îles et rives, bordées par une formation arborée à *Acacia nilotica*, capable de supporter plusieurs semaines d'inondation (Béehir *et al.*, 2019). Entre août et novembre, l'extension du lac est difficile à appréhender par télédétection, car il disparaît sous la végétation aquatique et les forêts inondées. Les espèces végétales et leur densité varient selon la nature des sols (argileux, argilo-sableux ou sableux). A partir de novembre-décembre, les cultures de décrue se développent en périphérie des marécages sur des parcelles défrichées, formant une ceinture agricole extérieure, récoltée en février-mars. Des sols nus apparaissent selon les conditions hydriques et les activités agricoles et pastorales, et sont eux aussi difficiles à suivre d'une année à autre. Les cultures

¹ Le programme pluridisciplinaire « Grands Ecosystèmes Lacustres Tchadiens », financé par FSPI de l'Ambassade de France, a réuni des chercheurs et étudiants tchadiens et français entre 2014 et 2017. Les résultats sur les aspects physiques et socio-économiques ont été présentés lors du colloque international à N'Djamena en 2017 et compilés dans l'ouvrage collectif *Le Tchad des lacs* (Raimond *et al.*, (eds), 2019). Depuis 2020, l'équipe poursuit ses recherches sur le lac Fitri au sein du LMI Viabeleaux (IRD / Université de N'Djaména).

pluviales sont réalisées dans la steppe à l'extérieur de la zone lacustre, entre juillet et octobre.

Le suivi par télédétection pose un triple défi : (i) couvrir une grande échelle pour intégrer la fragmentation du paysage ; (ii) discriminer des formations végétales très fragmentées représentant un continuum entre herbes et arbres, dont la phénologie varie selon la décrue et le type de sol ; et (iii) déterminer les périodes optimales d'observation dans l'année pour maximiser la précision de la classification. La cartographie des zones humides sahéliennes intégrant les cultures de décrue repose sur des approches méthodologiques variées. Par exemple, (Fotsing et Mainam, 2002) ont basé leur approche de télédétection sur les types de sols favorables aux cultures de décrue au Nord-Cameroun, tandis que (Mane et Fraval, 2001) ont utilisé les superficies inondées pendant la crue et les mesures de rendement des échantillons obtenus au laboratoire pour traiter les images satellitaires au Sénégal. Un premier travail a été réalisé sur cet espace du Fitri dans le cadre d'une thèse (Kemsol Nagorngar, 2018 ; Kemsol Nagorngar *et al.*, 2019), qui a permis de suivre la dynamique de l'occupation du sol sur 30 ans (1985 - 2015), notamment la remise en eau du lac après la période des grandes sécheresses. Cette étude reposait sur une classification contextuelle des images Landsat, utilisant des couples d'images crue/décrue.

Dans cette étude, nous proposons d'améliorer cette méthodologie en utilisant une image unique de décrue, analysée via une classification supervisée affinée dans un logiciel SIG. L'analyse diachronique repose sur le traitement d'images Landsat et Sentinel-2 sur une période de 20 ans, permettant de prendre en compte les effets du changement climatique (alternance d'années sèches et d'inondations exceptionnelles) et de la pression anthropique. Cette approche fournit des informations utiles aux décideurs et gestionnaires pour planifier des aménagements visant à limiter les risques et assurer la durabilité des zones humides. Il convient de noter que la répliquabilité de cette méthodologie à d'autres zones humides nécessite une connaissance précise du terrain, soulignant l'importance de suivis écologiques réguliers pour valider les analyses satellitaires.

2. Données et méthodes

La zone d'étude qui englobe le lac s'étend entre 12°30' et 13°15' de latitude Nord et 16°55' et 17°55' de longitude Est (figure 1). Le chef-lieu du département, Yao, est situé à environ 300 Km au Nord-Est de la capitale N'Djamena. Yao reste enclavé pendant la saison pluvieuse et la crue du lac entre juillet et septembre car la voie bitumée du département qui s'étend sur 100 Km environ et qui dessert les localités d'Am-Djamena-Bilala et d'Ambassatna jusqu'à Ati (chef-lieu de la Province du Batha), ne passe pas par Yao.

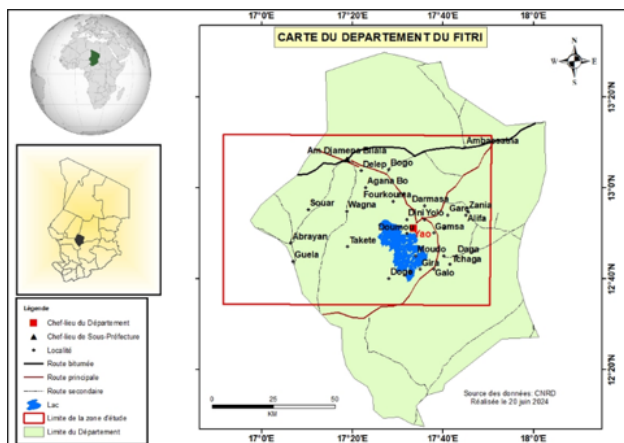


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude.

2.1 Données utilisées

Les images des satellites Landsat et Sentinel-2 sont analysées et contextualisées grâce aux données pluviométriques (ANAM) et démographiques (RGPH), et aux données d'observations sur le terrain (Cf. tableau 1).

Tableau 1 Liste des données utilisées

Données utilisées	Path (colonne)	Row (ligne)	résolution	Date d'acquisition	Sources
Image Landsat 7 ETM+	183	51	30 m	19 fév. 2002	https://glovis.usgs.gov
Image Landsat 8 OLI	183	51	30 m	14 janv. 2015	https://glovis.usgs.gov
Image Sentinel-2A_MSIL2A	Tuile T33 PYQ		10 m	19 fév. 2022	https://scihub.copernicus.eu
Données pluviométriques				1970 à 2023	Agence Nationale de Météorologie du Tchad (ANAM)
Données de Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH 2) du Tchad				2009 (extrapolé à 2022 grâce au taux d'accroissement)	Institut National de la Statistique, des Etudes Economiques et Démographiques du Tchad (INSEED)
Données de Recensement Général de l'Elevage du Tchad (RGE)				2012 à 2015 (extrapolé à 2022 grâce au taux de croit)	Ministère de l'Elevage et de la Production Animale du Tchad
Waypoints des différentes unités d'occupation du sol				2016 à 2022	Coordonnées des points GPS relevés sur le terrain

2.1.1. Images satellitaires Landsat et Sentinel-2

Les images utilisées proviennent des capteurs Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) et OLI (Operational Land Imager) des Landsat 7 et 8, téléchargées sur le site <http://glovis.usgs.gov>. Une scène Landsat a 180 km de côté, une résolution spatiale de 30m et un cycle orbital de 16 jours. Les images du lac Fitri sont projetées dans le système WGS 1984 et ont pour coordonnées dans la grille Landsat : Path (colonne) 183 et Row (ligne) 51. Les deux images Landsat téléchargées correspondent aux dates suivantes : 19/02/2002 et 14/01/2015. Le choix des dates est guidé par le stade de développement optimal du sorgho repiqué (janvier et février) qui constitue un élément essentiel du paysage du lac Fitri ainsi que la disponibilité des images dans les archives et leur couverture nuageuse. Les images téléchargées sont déjà corrigées des effets atmosphériques et ortho-rectifiées. Pour l'année 2022, c'est l'image Sentinel-2, téléchargée sur le site <https://scihub.copernicus.eu/> qui a été utilisée. Les images Sentinel-2 ont un cycle orbital de 5 jours, une scène de 290 km de côté et 13 bandes dont trois de 60 m de résolution spatiale ; six de 20 m et quatre de 10 m. L'image utilisée date de 19/02/2022, il s'agit d'un produit 2A c'est-à-dire ortho-rectifié avec correction atmosphérique. Les bandes de 10m de résolution spatiale (bandes 2, 3, 4 et 8) correspondant respectivement aux longueurs d'ondes bleue, verte, rouge et proche infrarouge ont été utilisées.

2.1.2. Données climatiques

Le climat du Fitri est de type tropical sec avec deux saisons bien marquées : une saison des pluies allant de juin à septembre et une saison sèche d'octobre à mai. L'amélioration des précipitations observées depuis une trentaine d'années au Fitri a pour conséquence d'une part, l'augmentation des zones inondables et du volume d'eau dans le lac et d'autre part, l'extension des zones de cultures de décrue. Les cumuls pluviométriques annuels (figure 2) ont permis de suivre l'évolution du paysage du Lac Fitri. L'étude est menée sur 20 ans (2002 à 2022) avec trois images traitées, mais il nous paraît judicieux d'exploiter toute la base de données climatique fournie par l'ANAM de 1970 à 2023 pour les mettre en perspective de l'évolution du Fitri.

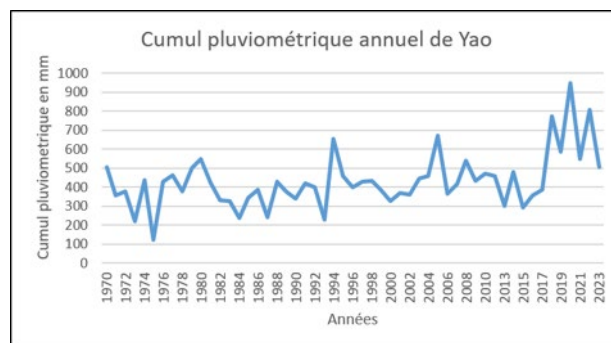


Figure 2 : Cumul pluviométrique annuel de Yao de 1970 à 2023 (Source : Agence Nationale de la Météorologie du Tchad).

2.1.3. Données démographiques humaines et animales

Les données démographiques disponibles indiquent une croissance soutenue de la population dans la région du lac Fitri au cours des dernières décennies. En 1989, la population était estimée à environ 59 500 habitants par le Bureau Interministériel d'Étude et de Programmation (BIEP, 1989). Lors du premier Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) en 1993, cette population atteignait environ 77 000 habitants, avant de passer à 110 400 habitants lors du second RGPH de 2009, ce qui correspond à une densité moyenne de 12,24 habitants/km² (INSEED, 2012).

L'élevage est aussi une activité importante au Fitri. Plusieurs systèmes cohabitent : système transhumant, système semi-transhumant et système sédentaire. Le Recensement Général de l'Élevage (RGE) du Tchad, réalisé par le Ministère de l'Élevage et des Productions Animales (MEPA) de 2012 à 2015 révèle des effectifs du cheptel bétail, toutes espèces confondues à plus de 93,8 millions (MEPA, 2017). La localisation géographique montre que la province du Batha, où se trouve le lac Fitri, comporte 12% des effectifs, soit plus de 11,8 millions de têtes de bétail. Les autres provinces sahéliennes du pays avec d'importants effectifs sont le Wadi Fira (9%), le Ouaddaï (9%), le Kanem (7%) et le Lac Tchad (7%), soit 44% pour les 5 provinces, équivalent à plus de 41 millions de têtes.

2.1.4. Observations de terrain

Plusieurs missions de terrain ont été effectuées entre 2016 et 2022, ce qui a permis de récolter plus de 900 points GPS, dont 879 retenus après nettoyage des doublons et des noms des villages. Ces points dont la précision est de 2 m, couvrent l'ensemble des principales classes d'occupation du sol identifiées dans la zone d'étude : la forêt, la savane la steppe, la prairie marécageuse, les zones des cultures (pluviale, décrue, maraîchère), les sols dénudés (naga) et les plans d'eau libre (Cf. tableau 2 et figure 3). Le choix des points est fait de façon aléatoire, suivant l'importance spatiale de l'unité, sa répartition, son accessibilité et la difficulté de discriminer l'unité pendant la classification de l'image satellitaire. Ces missions se sont déroulées respectivement aux dates suivantes :

- du 28 janvier au 25 février 2016, avec 497 points enregistrés après nettoyage ;
- du 10 au 20 mai 2017, 89 points enregistrés,
- du 06 au 16 avril 2022, 314 points enregistrés dont 293 utilisés, les 21 points sur la localisation des villages.

Ces différents points ont servi à la classification des images de 2015 et 2022, celle de 2002 a été validée à dire d'acteurs sur le terrain.

Tableau 2: Nombre de points GPS récoltés sur le terrain et utilisés dans la classification

Nom de l'unité	Année		
	2016	2017	2022
Culture de décrue	134	25	100
Culture pluviale	94	12	34
Forêt claire	40	7	21
Plan d'eau libre	13	3	7
Prairie marécageuse	14	5	11
Savane arbustive – arborée	101	17	36
Steppe arbustive – herbeuse	76	16	48
Sol nu	25	4	39
Total	497	89	293

Les 60% de ces points ont servi à la classification supervisée et les 40% à la validation des résultats obtenus, selon une procédure de séparation aléatoire et indépendante. La figure 3 illustre la répartition spatiale des points de terrain collectés sur fond d'image Landsat 8 et Sentinel-2.

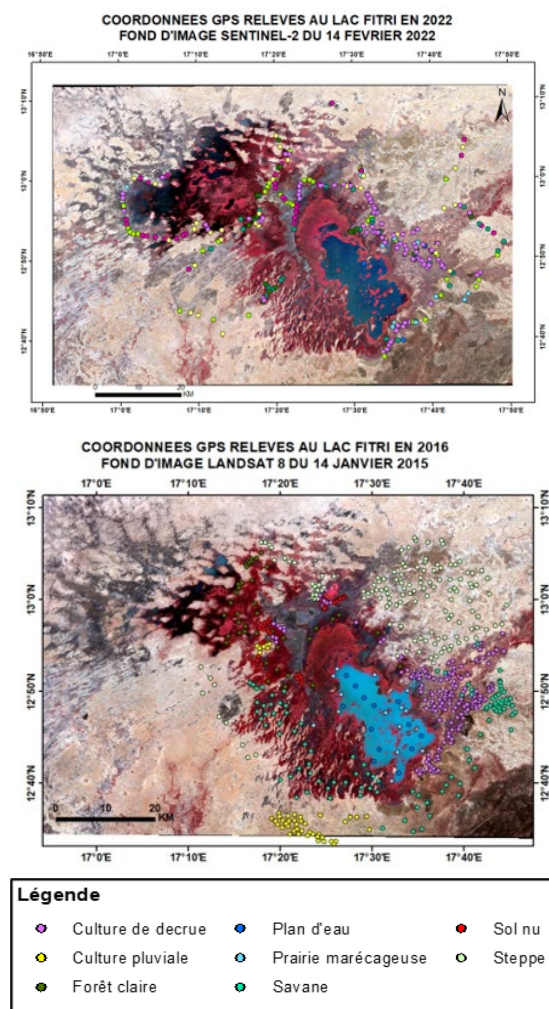


Figure 3 : Points GPS (précision 2 m) collectés sur le terrain en 2016, 2017 et 2022 sur fond d'image Landsat 8 du 14 janvier 2015

2.2. Méthodologie

2.2.1. Classification des images satellitaires et cartographie

Le logiciel ENVI 5.3 a été utilisé pour la classification des images satellitaires et le logiciel ArcGIS 10.6.1 pour le calcul de la dynamique de l'occupation du sol. Plusieurs méthodes de classification (Girard et Girard, 1999) supervisées ont été explorées ; notamment le maximum de vraisemblance, le minimum de distance et l'arbre de décision exploitant les indices de végétation (NDVI et NDWI). Mais aucune de ces méthodes n'a donné de satisfaction à elles seules. Ayant utilisé plus de 800 points GPS relevés sur le terrain entre 2016 et 2022, nous étions en mesure de détecter visuellement les erreurs, même avec un bon indice kappa. Ainsi, une digitalisation des contours des cultures de décrue a été réalisée après la classification par la méthode du maximum de vraisemblance suivant le schéma présenté (figure 4).

La précision générale et le coefficient kappa se rapprochent dans les classifications par les méthodes de maximum de vraisemblance et le minimum de distance. Cependant, avec le classificateur Minimum de Distance, les confusions interclasses des cultures de décrue sont de l'ordre de 30 à 45% avec les sols nus et les savanes arbustives. Ce constat a conduit à tester la méthode de classification supervisée par arbre de décision. Il s'agit de sélectionner des variables discriminantes pour partitionner progressivement les observations définies par une ou plusieurs variables réponses (Campedel, 2005). Chaque division vise à réduire l'hétérogénéité intra-groupe de la réponse tout en augmentant l'hétérogénéité inter-groupes. Trois indices couramment utilisés dans l'occupation des sols ont été calculés. Il s'agit de l'indice de végétation normalisé (NDVI), l'indice de brillance (IB) et l'indice d'humidité (IH).

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'onde «Proche Infra-Rouge » (« PIR ») et « Rouge » (« R ») (Rouse *et al.*, 1974). Sa formule est :

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{PIR} - \text{R})}{(\text{PIR} + \text{R})} \quad (\text{éq.1})$$

Le NDVI est donc directement lié à l'activité photosynthétique des plantes. Quant aux deux autres indices (brillance et humidité), ils ont été calculés à partir de « Tasseled Cap » ou « chapeau à cône » qui est une technique de traitement orthogonal linéaire basée sur une observation de la trajectoire de cultures (Kauth et Thomas, 1976). L'implémentation de Tasseled Cap dans le logiciel Envi, facilite le calcul automatique, mais ces indices peuvent être calculés manuellement en utilisant la fonction « Band Math » et les coefficients de transformation.

Malheureusement aucun de ces indices n'a permis de partitionner correctement l'arbre de décision pour aboutir à une extraction homogène des zones cultivées en décrue. En effet, l'utilisation de NDVI, entraîne des confusions notables entre les cultures de décrue et les savanes arbustives clairsemées. L'indice de brillance

affecte les cultures de décrue aux sols nus tandis que l'indice d'humidité confond les zones cultivées en décrue avec les zones inondées non cultivées. Les cultures de décrue n'ont pas une réflectance propre ni une forme définie dans le lac Fitri. Elles sont installées dans des zones préalablement inondées et défrichées.

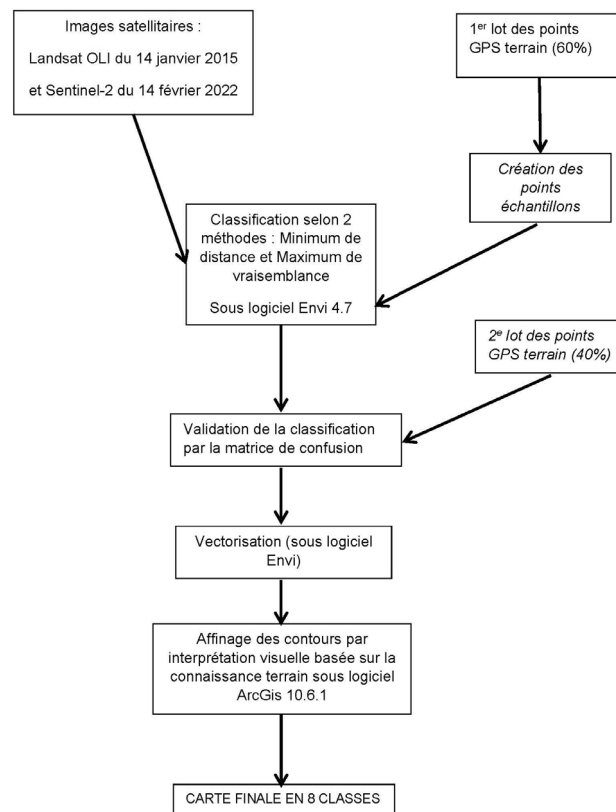


Figure 4 : Diagramme de traitement des images Landsat et Sentinel-2 du Lac Fitri pour la classification de l'occupation du sol.

Huit (8) classes d'occupation du sol ont été définies à partir des observations du paysage. Les habitations n'ont pas pu être cartographiées à l'échelle de cette étude, car en dehors des trois villes que sont Yao (chef-lieu du Département), Am-Djaména Bilala (chef-lieu de Sous-Préfecture) et Ambassatna, les autres sont des villages avec quelques cases éparses se confondant soit avec la steppe, soit avec le sol nu. Les classes retenues sont présentées ci-dessous.

Cultures de décrue (CD) : La culture de décrue ou de contre-saison consiste à semer ou repiquer sur les terres ayant été inondées saisonnièrement (Raimond *et al.*, 2014], la fertilité des sols étant régulièrement renouvelée par la crue. Plusieurs espèces sont cultivées en décrue : céréales (maïs, sorgho), niébé, concombre, melon, pastèque, gombo, tomate, piment, etc. Au Fitri, c'est le sorgho, connu localement sous le nom de « berbéré » qui domine le paysage des cultures de décrue (figure 5). Il est repiqué de préférence sur les vertisols qui ont une

importante capacité de rétention d'eau et d'échange cationique (Raimond, 1999). Repiqué en octobre-novembre, le « berbéré » est récolté en février-mars.

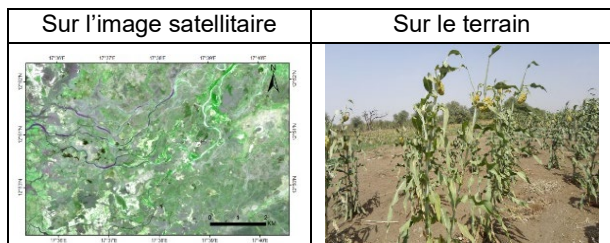


Figure 5 : Présentation de cultures de décrue sur l'image satellitaire en fausse couleur (bandes 2, 4 et 8) et sur le terrain. Crédits Photo : Kemsol Nagorngar, avril 2022.

b. Cultures pluviales (CP) : se pratiquent sous pluie de juin à septembre et concernent le sorgho pluvial, le mil, le niébé, l'arachide et divers légumes tels que le gombo, l'oseille de Guinée, le piment, le concombres (figure 6).

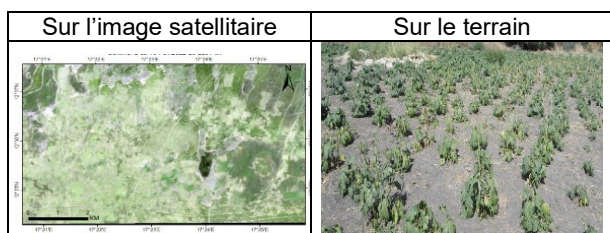


Figure 6 : Présentation des cultures pluviales sur l'image (parcellaire en couleurs claires). Composition colorée en en fausse couleur (bandes 2, 4 et 8) et sur le terrain. Crédits Photo : Kemsol Nagorngar, avril 2022.

c. Forêt Claire (FC) englobe aussi la forêt galerie. Le recouvrement global des espèces ligneuses est supérieur à 75% et une majorité des arbres ayant une hauteur supérieure à 10 m. Les principales espèces rencontrées dans cette formation sont : *Acacia nilotica*, *Faidherbia albida* et *Hyphaena thebaica*, (figure 7).

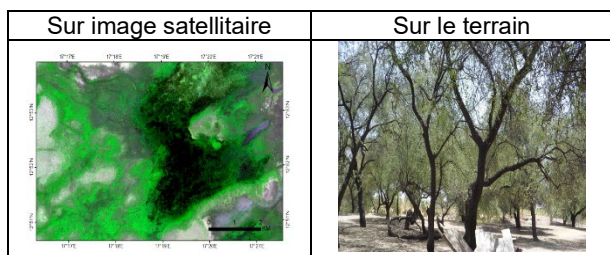


Figure 7 : Présentation de la forêt claire sur l'image (couleur vert clair et le vert foncé indique la présence de l'eau sous les arbres) en fausse couleur (bandes 2, 4 et 8) et sur le terrain. Crédits Photo : Kemsol Nagorngar, avril 2022.

d. Savane Arbustive (SA) : rassemble la savane arborée et la savane boisée. Le recouvrement global des espèces ligneuses varie de 50 à 75%, comportant des arbres et arbustes de hauteur variant entre 5 et 10 m. Les principales espèces rencontrées sont plus diversifiées :

Acacia nilotica, *Acacia senegal*, *Acacia seyal*, *Acacia mellifera*, *Acacia sieberiana*, *Balanites aegyptiaca*, *Borassus aethiopum*, *Combretum aculeatum*, *Dalbergia melanoxylon*, *Dichrostachys glomerata*, *Hyphaena thebaica*, *Mitragyna inermis*, *Terminalia laxiflora*, *Ziziphus mauritiana* (figure 8).

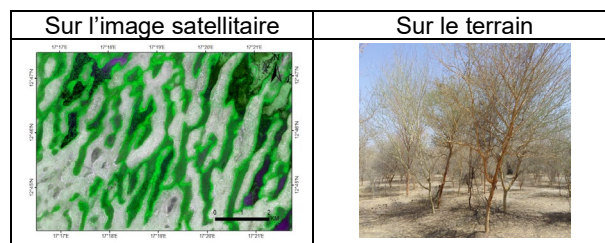


Figure 8 : Présentation de la savane sur l'image satellitaire (la couleur verte représente la savane boisée, la couleur blanc-gris, la savane arbustive très clairsemée faisant apparaître du sol nu et la couleur noire, l'eau libre). Composition colorée en fausse couleur (bandes 2, 4 et 8) et sur le terrain. Crédits Photo : Kemsol Nagorngar, avril 2022.

e. Steppe (Step) : rassemble la steppe arbustive, herbeuse, buissonnante et la jachère. Le recouvrement global des espèces ligneuses est inférieur à 50%, comportant des arbustes dont la hauteur est inférieure à 7 m. Les principales espèces végétales rencontrées sont : *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*, *Calotropis procera*, *Capparis decidua*, *Hyphaena thebaica*, *Indigofera oblongifolia*, *Salvadora persica*, *Ziziphus mauritiana* (figure 9).

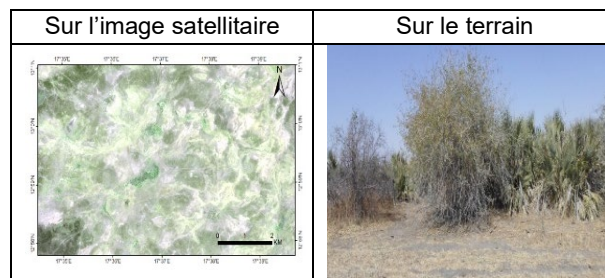


Figure 9 : Présentation de la steppe sur l'image satellitaire. Composition colorée en fausse couleur (bandes 2, 4 et 8) et sur le terrain. Crédits Photo : Kemsol Nagorngar, avril 2022.

f. Prairie Marécageuse (PM) : ou plaine herbeuse comprend des zones inondées permanentes ou temporaires avec un tapis herbeux composé principalement de *Echinochloa stagnina*, *Voscia spp.*, *Ipomea sp.*, (figure 10).

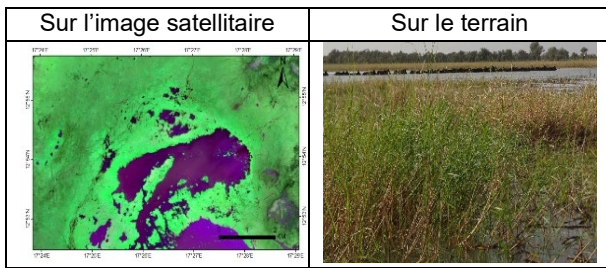


Figure 10 : Présentation de la prairie marécageuse (en vert vif et l'eau libre en violet-noir) sur l'image satellitaire. Composition colorée en fausse couleur (bandes 2, 4 et 8) et sur le terrain. Crédits Photo : C. Raimond.

g. Plan d'eau (PE) : comprend toutes les surfaces d'eau libre (lac, rivière, mares ; en violet d'autant plus foncé que la profondeur est grande (Cf. figure 10).

h. Sol Nu (SN) : comporte des sols dénudés et incultes en raison des conditions édaphiques ou suite à une activité anthropique trop intense (figure 11).

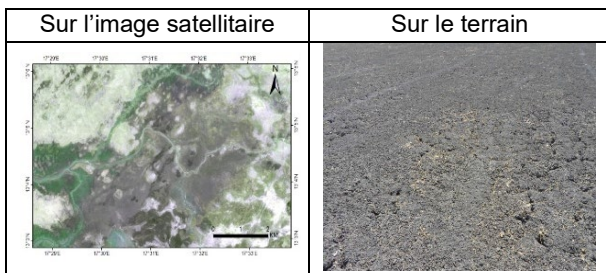


Figure 11 : Présentation du sol nu sur l'image satellitaire et sur le terrain. Composition colorée en fausse couleur (bandes 2, 4 et 8). Crédits Photo : Kemsol Nagorngar, avril 2022.

L'unité qui pose réellement des difficultés dans la classification correspond aux cultures de décrue car suivant l'espacement de repiquage entre les lignes et les poquets et suivant la taille de la plante, ces cultures se confondent soit au sol nu, soit à la savane arbustive. Ainsi, le sorgho de décrue est repiqué soit sur sol nu inondé préalablement par la crue du lac ou par les eaux de pluie, soit installé après défrichage de la savane ou de la forêt pour les nouveaux champs (Raimond, 1999 ; Kemsol Nagorngar, 2018). Epousant le microrelief, ces parcelles cultivées n'ont aucune forme reconnaissable sur les images satellitaires et les densités de repiquage sont trop faibles pour permettre de les distinguer des autres unités du paysage dans lesquelles elles sont installées. Ainsi, leurs valeurs radiométriques se rapprochent soit des sols nus soit des savanes (Kemsol Nagorngar *et al.*, 2019).

Par ailleurs, nous avons observé des vertisols incultes au milieu des vertisols cultivés. Ces sols incultes sont connus localement en langue bilala sous le nom de «kosso», dépourvus de végétation arbustive avec une végétation herbeuse clairsemée. Leur surface est brillante avec des fentes de retrait très petites comparées aux vertisols exploités en culture de décrue. Etant donné leur alternance avec les vertisols fertiles, ils induisent de

grandes confusions lors de la classification des images satellitaires.

Cette situation nous a conduit à combiner deux méthodes : d'abord la classification par le maximum de vraisemblance qui donne des résultats satisfaisants pour les unités d'occupation du sol que sont la forêt, la savane, la steppe, les cultures pluviales, la prairie marécageuse, le sol nu et l'eau. Les précisions par classe sont présentées dans la section résultats. Ensuite, nous avons réalisé une délimitation manuelle sous ArcGIS, fastidieuse mais utile, pour faire ressortir les cultures de décrue qui apparaissaient pixellisées après la classification. Cette opération a été contrôlée par la densité des points GPS collectés sur le terrain, correspondant aux cultures de décrue, et à notre connaissance de terrain.

2.2.2 : La matrice de confusion

Les résultats des classifications, réalisées en utilisant 60 % des points GPS disponibles, ont été confrontés au reste des points n'ayant pas servi à la classification à travers une matrice de confusion. La matrice de confusion est un tableau à double entrées où les classes d'occupation des sols se trouvent en ligne et les données du contrôle-terrain en colonne (Arouna, 2012). Sur la diagonale se trouvent les unités bien identifiées ; de part et d'autre de cette diagonale se trouvent les erreurs d'omission et de commission. La matrice de confusion permet d'estimer la précision globale de la classification ainsi que les erreurs d'omission et de commission pour chaque classe thématique (Chalifoux *et al.*, 2006). Deux indices ont donc été employés à cet effet. Il s'agit de la précision globale qui est la proportion des pixels bien classés et l'indice Kappa qui mesure le degré d'accord entre la classification et la vérité terrain en tenant compte de l'accord dû au hasard (Congalton, 1991) car il s'exprime en termes de précision globale observée et de précision prévue. Dans la matrice (Cf. tableaux 4 et 5) sont présentés les résultats et leur précision par classe. Ces indices s'obtiennent par les formules (Chalifoux *et al.*, 2006) suivantes :

$$K = \frac{a-b}{1-b} \quad (\text{éq.2})$$

$$a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{Nc} X_{ii} \quad (\text{éq.3})$$

$$b = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{Nc} (X_{+i} + X_{i+}) \quad (\text{éq. 4})$$

Avec K : Indice Kappa

a : Précision globale observée

b : Précision prévue

N : Nombre total d'observations

Nc : Nombre de classes

X_{ii} : Nombre d'observations dans la colonne i, ligne i (diagonale de la matrice)

X_{+i} : Total des observations dans la colonne i (total à droite dans la matrice)

X_{i+} : Total des observations dans la ligne i (total à gauche de la matrice).

Selon (Chalifoux *et al.*, 2006), l'indice Kappa évalue dans la matrice de confusion l'accord entre les résultats obtenus et la vérité sur le terrain. Sa valeur varie de 0 à 1 et il se divise en 5 catégories : accord très faible de 0 à 0,20 ; faible de 0,21 à 0,40 ; modéré de 0,41 à 0,60, substantiel de 0,61 à 0,80 et parfait de 0,81 à 1. Pour (Pontius, 2000), dans une étude d'occupation des sols, lorsque l'indice Kappa évalué dans les opérations de classification est compris entre 50 et 75%, la classification adoptée est valable et les résultats peuvent être judicieusement utilisés.

Les matrices de confusion ont été établies pour les classifications des années 2015 et 2022 à partir des points de contrôle relevés respectivement en janvier-février 2016 et en avril 2022. En l'absence de données de terrain contemporaines pour l'année 2002, la validation de cette classification repose sur une approche qualitative participative, fondée sur la confrontation des cartes produites avec la mémoire collective des autorités locales, traditionnelles et des groupements de producteurs lors des enquêtes de terrain menées en mars 2016. Cette validation qualitative a permis de confirmer la cohérence spatiale générale des unités cartographiées à cette période.

2.2.3. Calcul de la dynamique paysagère

À l'issue de la classification, il a été procédé à l'analyse de l'évolution des unités d'occupation du sol par le calcul des taux moyens annuels d'expansion spatiale (T) et la matrice de transition.

Le taux moyen annualisé d'expansion spatiale exprime la proportion de chaque classe d'occupation du sol qui change annuellement. Il est calculé par la formule de Bernier (1992). En effet, cette approche fournit des informations sur les passages d'une classe à une autre, à partir desquelles l'évolution globale de chaque classe d'occupation peut être facilement calculée.

$$T = \frac{[\ln S_2 - \ln S_1]}{[(t_2 - t_1) \times \ln e]} \times 100 \text{ (ég.5)}$$

S1 : superficie d'une unité à la date t1

S2 : superficie de la même unité à la date t2

t2-t1 : nombre d'années d'évolution

ln : logarithme népérien

e : base du logarithme népérien (e = 2,71828)

La matrice est un carré où les lignes et colonnes correspondent aux mêmes classes et la diagonale montre la superficie inchangée. Elle permet de mettre en évidence les différentes formes de conversions qu'ont subies les unités d'occupation du sol. Elle résulte du croisement des cartes par géotraitement sous ArcGIS. En effet, les différentes unités d'occupation du sol, sous format raster, ont été recodifiées par l'outil « Reclass – Reclassify » de Spatial Analyst Tools. Le code attribué respecte un gradient décroissant de densité du couvert végétal, exception faite pour le plan d'eau et des zones de cultures (pluviales ou décrue). La valeur pour le plan d'eau a été arbitrairement choisie entre celles de la steppe et de la plaine marécageuse pour marquer une transition paysagère importante alors que de bien entendu, il ne porte pas de végétation. Il est très difficile de déterminer lesquelles des cultures pluviales et de décrue sont les plus denses par rapport à leur couvert végétal, qui dépend des espèces cultivées et des

systèmes de culture (cultures associées, fertilité et capacité de rétention en eau des sols), aussi l'attribution des codes 200 et 300 est-elle aléatoire. Les résultats obtenus pour les deux classes ne peuvent être interprétés comme progressifs ou régressifs entre les deux classes considérées. En revanche, ils sont valables lorsque chacune des classes est comparée au sol nu ou à la végétation (Cf. tableau 3).

Tableau 3: Codification des unités d'occupation du sol en fonction des années d'observation

Unité d'occupation du sol	Code / Année		
	2002	2015	2022
Sol nu	100	10	1
Culture pluviale	200	20	2
Culture de décrue	300	30	3
Prairie marécageuse	400	40	4
Plan d'eau	500	50	5
Steppe	600	60	6
Savane arbustive	700	70	7
Forêt claire	800	80	8

Pour générer la carte de dynamique, l'opération sous ArcGIS a été réalisée en utilisant l'outil « Map Algebra – Raster Calculator » de Spatial Analyst Tools. En additionnant deux à deux les rasters recodifiés, cela permet d'obtenir trois grandes classes qui sont : la stabilité, la dégradation et la régénération. Les notions de dégradation et de régénération sont ici fonctionnelles et relatives au couvert végétal et non à une évaluation écologique exhaustive. Par exemple, la classe « savane arbustive » a le code 700 en 2002, 70 en 2015 et 7 en 2022. Si dans la carte de dynamique générée, le code 700 est passé à 770 en 2015 ou 707 en 2022, cela veut dire qu'il n'y a pas eu de changement entre les deux dates considérées, donc l'unité est demeurée stable. Si le code 700 passe à 760 en 2015 ou encore 706 en 2022, cela signifie qu'il y a eu régression, ou évolution négative, ou dégradation, car l'unité est passée à une classe inférieure (elle s'est transformée en steppe). Mais si au contraire, le code 700 est passé à 780 en 2015 ou 708 en 2022, l'unité a progressé, il s'agit d'une évolution positive ou régénération, l'unité est passée à une classe supérieure (elle s'est transformée en forêt). La matrice de transition est donc obtenue en réalisant des calculs automatiques des superficies sur les tables attributaires.

3. Résultats

Les résultats obtenus, présentés dans cette section, sont les matrices de confusion, de transition, les cartes d'occupation du sol et la dynamique paysagère du Fitri entre 2002 et 2022.

3.1 Les matrices de confusion

Les matrices de confusion 2015 et 2022 sont présentées dans les tableaux 4 et 5. Les précisions générales sont calculées aussi bien par rapport aux erreurs de commission que d'omission.

Tableau 4 : Matrice de confusion de 2015

Précision générale : 67,87%								
Coefficient Kappa : 0,62								
Classe	Pourcentage de la précision par classe par rapport à la vérité terrain							
	SN	CP	CD	PM	PE	Step	SA	FC
SN	100	1,73	10,41	0	0	0	1,45	0
CP	0	59,84	4,29	0	0	23,27	2,03	0
CD	0	0,66	45,31	0	0	0	0	2,53
PM	0	0	0	94,64	0	0	0	0
PE	0	0	0	0	100	0	0	0
Step	0	34,18	18,98	0	0	64,50	30,43	0
SA	0	3,62	19,39	1,79	4,1	11,83	57,39	13,5
FC	0,63	1,53	0,11	3,57	0	0,18	8,70	83,97

CD : Culture de décrue ; CP : Culture pluviale ; FC : Forêt claire ; SA : Savane arbustive ; PE : Plan d'eau ; PM : Prairie marécageuse ; SN : Sol nu ; Step : Steppe

La matrice de confusion de 2015 donne une précision générale de 67,87% avec un coefficient Kappa de 0,62. Une opération post-classification a permis de redessiner manuellement les contours de cultures de décrue pour améliorer la classification. On note cependant des confusions importantes au niveau de :

- ✓ La savane arbustive avec la steppe (30,43%), la forêt claire (8,70%).
- ✓ La steppe avec la culture pluviale (23,27%), la savane arbustive (11,83%).
- ✓ Les cultures pluviales se confondent avec la steppe (34,18%) et la savane arbustive (3,62%).
- ✓ Les cultures de décrue sont celles qui se confondent avec le plus grand nombre de classes : sol nu, savane arbustive, steppe, forêt claire.

Tableau 5 : Matrice de confusion de 2022

Précision générale : 70,60%								
Coefficient Kappa : 0,66								
Classe	Pourcentage de la précision par classe par rapport à la vérité terrain							
	SN	CP	CD	PM	PE	Step	SA	FC
SN	54,81	0	5,20	0	0	0,05	0,36	0,31
CP	12,92	77,36	0,77	0	0	21,29	6,74	0,24
CD	27,57	0	84,55	0,29	0	6,92	0,42	1,42
PM	0	0	0	76,07	0,04	4,87	0,10	0,19
PE	0	0	0,03	0	99,76	0	0	0
Step	3,70	22,45	0,91	0	0	48,54	18,49	0,50
SA	1,01	0,19	7,05	23,01	0	22,76	52,88	23,33
FC	0	0	1,49	0,62	0	0,43	21,01	74,02

CD : Culture de décrue ; CP : Culture pluviale ; FC : Forêt claire ; SA : Savane arbustive ; PE : Plan d'eau ; PM : Prairie marécageuse ; SN : Sol nu ; Step : Steppe

Pour l'année 2022, la précision générale est de 70,60% et le coefficient Kappa de 0,66. Cette classification est meilleure par rapport à celle de 2015 due à la précision de l'image utilisée. En effet les bandes de Sentinel-2 utilisées sont à 10 m de résolution comparées à celles de

2015 (30 m de résolution spatiale). Cependant, l'augmentation du taux de pixels bien classés (diagonale des matrices) n'est pas uniforme selon les unités paysagères. Pour les deux années, le taux de pixels bien classés dans les plans d'eau est proche de 100 %. Ce taux augmente sensiblement entre 2015 et 2022 pour les cultures pluviales et les cultures de décrue (respectivement : de 60% à 77% et de 45% à 84%). Il baisse pour la steppe, la savane arbustive et la forêt (respectivement, de 65% à 49%, 57% à 53% et de 84% à 74%) et considérablement pour les sols nus et la prairie marécageuse (de 100% à 55% et de 95% à 76%).

Ainsi, si les confusions sont réduites entre savane arbustive et steppe qui passent de 30% à 18%, entre steppe et culture pluviale (de 23% à 21%). Entre culture pluviale et steppe de 34% à 22%, elles restent encore élevées. De plus, les confusions entre savane arbustive, steppe et forêt claire ont beaucoup augmenté.

3.2. Les cartes d'occupation du sol

Les cartes d'occupation du sol sont classées en huit unités paysagères (figures 12 à 14).

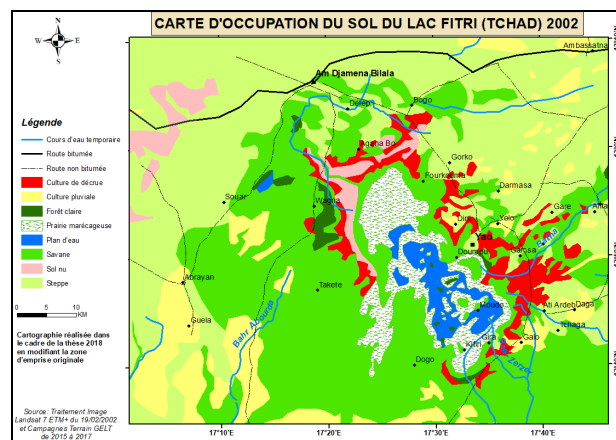


Figure 12 : Carte d'occupation du sol du lac Fitri en 2002

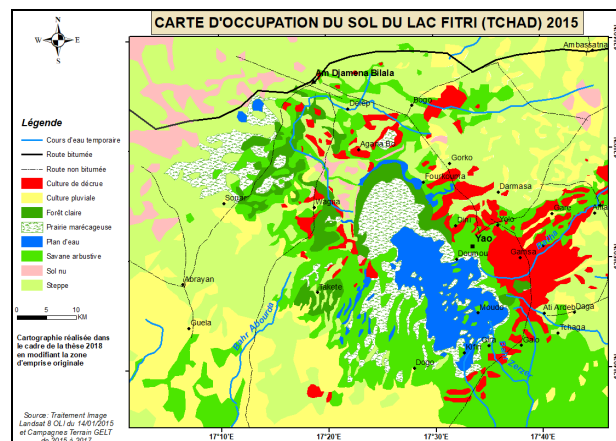


Figure 13 : Carte d'occupation du sol du lac Fitri en 2015

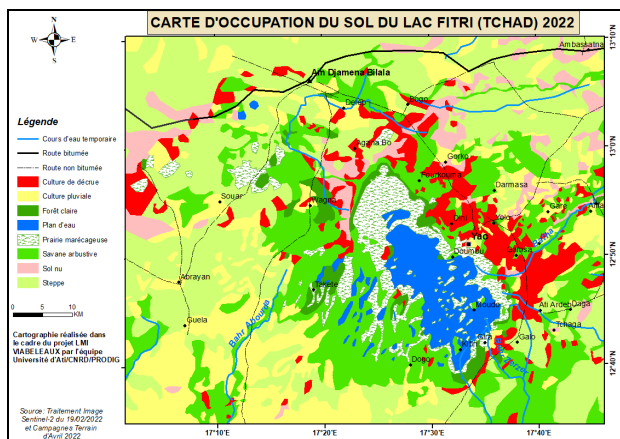


Figure 14 : Carte d'occupation du sol du lac Fitri en 2022

Les superficies par classes sont présentées dans le tableau 6 et figure 15. Les chiffres sont volontairement arrondis à l'unité pour faciliter la lecture. L'arrondi des superficies peut induire de légères différences par rapport aux valeurs exactes, sans toutefois affecter les tendances générales observées.

Tableau 6: Superficies en kilomètre carré et proportion en pourcentage des différentes classes d'occupation du sol du Fitri entre 2002 et 2022

Classes d'occupation du sol	2002		Δ 2002 - 2015		2015		Δ 2015 - 2022		2022	
	km ²	%	km ²	km ²	%	km ²	km ²	km ²	%	
Sol nu	240	3	166	406	6	-6	400	5		
Culture de décrue	253	3	131	384	5	75	459	6		
Culture pluviale	707	10	486	1193	16	72	1266	17		
Prairie marécageuse	281	4	61	342	5	-42	300	4		
Plan d'eau	118	2	120	238	3	14	252	3		
Steppe	3505	48	-191	3314	45	-149	3165	43		
Savane arbustive	2164	29	-903	1261	17	123	1384	19		
Forêt claire	85	1	130	215	3	-87	128	2		

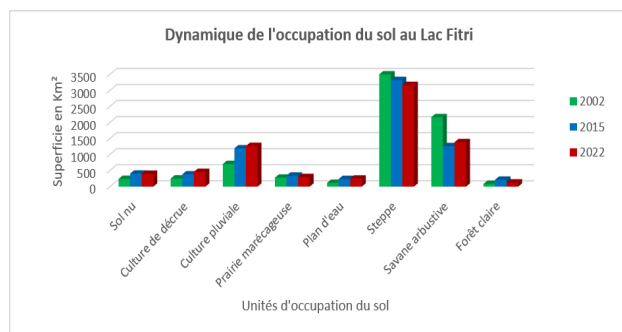


Figure 15 : Les unités d'occupation du sol du lac Fitri entre 2002 et 2022

L'analyse des cartes d'occupation du sol et des superficies par classe d'unité de paysage montre que, au mois de février, la steppe domine le paysage du Fitri, suivie par la savane

La steppe, bien que dominante sur l'ensemble de la période, enregistre une diminution nette de 340 km² entre 2002 et 2022, soit une perte relative d'environ 5 points de

pourcentage. Les zones de cultures, au contraire, sont en progression sur toutes les périodes considérées. La savane arbustive enregistre la plus grande régression entre 2002 et 2015, où elle est réduite de plus de 40% de sa superficie. Inversement, dans la même période, les cultures pluviales se sont beaucoup étendues en passant de 707 à 1193 km² (environ 6 points de pourcentage). L'augmentation des cultures de décrue est moins importante et plus régulière sur les trois dates, de 253 km² en 2015 à 459 km² en 2022. Les forêts ont augmenté entre 2002 et 2015, puis fortement diminué dans la période suivante, même si leur extension reste positive sur l'ensemble de la période.

3.3. Les matrices de transition

L'évolution des classes d'occupation du sol entre les différentes dates et la synthèse en gains, pertes et soldes net par classe sont rapportées dans les tableaux 7 et 8.

Tableau 7: Synthèse en gains, pertes et solde net par classe entre 2002 et 2015 (superficie en km²)

Classe	2002-2015					
	Gain		Perte		Solde net	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Sol nu	273,65	9,17	111,24	3,69	162,41	5,48
Culture pluviale	799,85	26,80	316,74	10,49	483,11	16,31
Culture de décrue	247,61	8,30	129,32	4,28	118,28	4,01
Prairie marécageuse	185,31	6,21	121,82	4,04	63,49	2,17
Plan d'eau	132,30	4,43	10,08	0,33	122,22	4,10
Steppe	855,55	28,67	1031,82	34,19	-176,27	-5,52
Savane arbustive	329,88	11,05	1252,93	41,51	-923,05	-30,46
Forêt claire	160,34	5,37	44,14	1,46	116,21	3,91

Tableau 8 : Synthèse en gains, pertes et solde net par classe entre 2015 et 2022 (superficie en km²)

Classe	2015-2022					
	Gain		Perte		Solde net	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Sol nu	307,74	8,82	314,06	9,00	-6,32	-0,18
Culture pluviale	739,47	21,18	663,91	19,02	75,56	2,16
Culture de décrue	269,79	7,73	182,84	5,24	86,95	2,49
Prairie marécageuse	123,26	3,53	167,85	4,81	-44,59	-1,28
Plan d'eau	48,99	1,40	33,29	0,95	15,69	0,45
Steppe	1221,15	34,98	1301,38	37,28	-80,23	-2,30
Savane arbustive	724,09	20,74	672,64	19,27	51,45	1,47
Forêt claire	56,65	1,62	155,17	4,44	-98,53	-2,82

Les matrices montrent la diminution de la steppe sur les deux périodes considérées et l'augmentation des zones de culture et du plan d'eau dans les mêmes périodes. La savane arbustive dont le solde est négatif dans la période 2002-2015 a augmenté. Inversement, le solde de la forêt claire qui était positif dans la première période, a chuté dans la seconde.

3.4. Le taux moyen annuel d'expansion spatiale

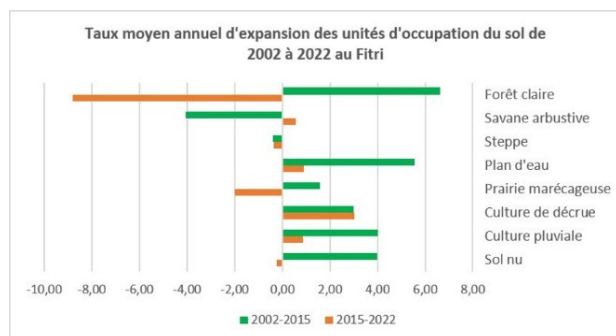


Figure 16 : Taux moyen annuel d'expansion spatiale

La figure 16 présente le taux moyen annuel d'expansion spatiale et renseigne sur les éléments suivants. De 2002 à 2015, soit 13 ans (représenté en couleur verte sur le graphique) : la forêt claire, le plan d'eau, la prairie marécageuse, la culture de décrue, la culture pluviale et le sol nu, ont tous connu un taux moyen annuel d'expansion spatiale positifs sauf la savane arbustive et la steppe qui ont connu des taux négatifs. De 2015 à 2022, soit 7 ans (représenté en couleur rouge sur la figure) : on note un fort taux négatif de la forêt claire (-8,79), de la prairie marécageuse (-2) et dans une moindre mesure la steppe (-0,35) et le sol nu (-0,23).

3.5. Dynamique de l'occupation du sol

Les changements entre 2002 et 2015 d'une part et entre 2015 et 2022, d'autre part, obtenus à partir des bilans des gains, pertes et soldes nets, sont présentés aux figures 17 et 18. Les zones dégradées sont celles qui ont été essentiellement mises en cultures (pluviales, maraîchage et de décrue) sans compter les effets du surpâturage et de l'orpaillage. La régénération est surtout liée à la bonne pluviométrie et à une crue plus étendue lors des dernières années, qui a permis la remise en culture des sols nus et une amélioration du couvert végétal dans la savane arbustive.

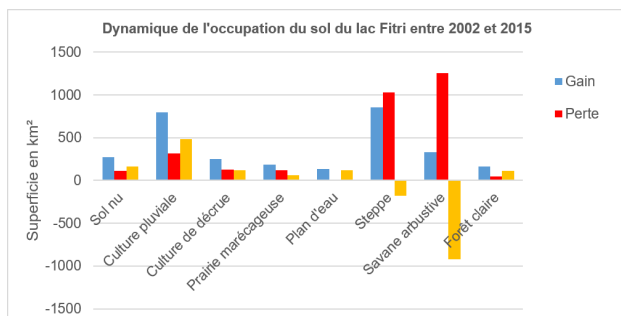


Figure 17 : Changements dans l'occupation du sol du Fitri entre 2002 et 2015

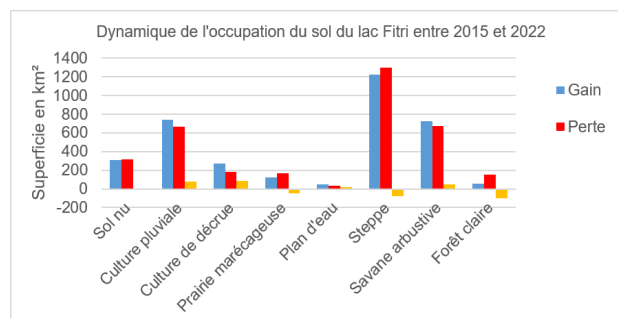


Figure 18 : Changements dans l'occupation du sol du Fitri entre 2015 et 2022

Le bilan de l'évolution entre 2002 et 2022 montre une stabilité de 50% du paysage, alors que 16 % présente une régénération et 34 % une dégradation (figure 19).

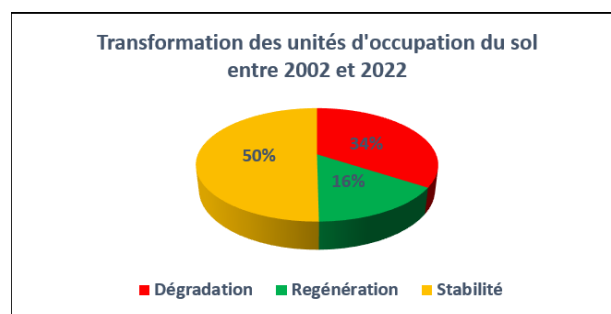


Figure 19 : Bilan des changements paysagers intervenus au lac Fitri entre 2002 et 2022

4. Discussion

La discussion propose de revenir d'abord sur la méthode de classification, d'une part, et sur les facteurs explicatifs de la dynamique paysagère, d'autre part.

4.1. La méthode de classification

Pour être utilisée avec certitude, une classification a besoin d'être évaluée afin de connaître le niveau d'erreur associé. Dans notre cas, les matrices de confusions, évaluant les erreurs d'omission, de commission et d'appréciation générale des classifications effectuées aux différentes dates, donnent des pourcentages de pixels bien classés allant de 68 à 71%, ce qui permet d'exploiter judicieusement les résultats (Pontius, 2000). Cependant, des confusions interclasses sont observées notamment dans la classification de 2015. Il s'agit de :

- ✓ La savane arbustive avec la steppe (30,43%), la forêt (8,70%). Ces confusions s'expliquent par le fait que la savane comporte les savanes arborées et boisées qui se retrouvent également dans la forêt, la savane dégradée qu'on retrouve aussi dans la steppe ainsi que des flots de cultures pluviales et de décrue qui sont nouvellement défrichés au sein de cette unité.
- ✓ La steppe avec la culture pluviale (23,27%), la savane arbustive (11,83%). En effet ces confusions sont dues au fait que la classe steppe comporte des jachères (qui sont des

zones ayant été mises en cultures) ainsi que des espèces ligneuses rabougries qu'on retrouve également dans la savane arbustive.

- ✓ Les cultures pluviales se confondent avec la steppe (34,18%) la savane arbustive (3,62%) où elles se localisent.
- ✓ Les cultures de décrue sont celles qui se confondent avec le plus grand nombre de classes. Leur faible taux de couverture au sol, les rapproche des sols nus tandis que leur stade végétatif les rapproche des cultures pluviales. Les nouvelles zones de production les rapprochent de l'unité qui a été défrichée pour les installer (savane, steppe, forêt).

Qu'elles se produisent en 2015 ou 2022, ces confusions relèvent de la complexité du paysage où l'on observe un gradient de formes de dégradation ou de régénération entre les classes de forêt, de savane et de steppe. Ainsi, le défrichement de nouveaux champs, l'abandon des anciens champs ou l'élagage des arbres pour l'élevage dans une mosaïque paysagère fragmentée apportent des confusions que les méthodes de classification automatique ont du mal à dissocier. Alors que les méthodes de télédétection se perfectionnent dans de nombreux milieux, y compris au Sahel, en intégrant des méthodes de deep learning telles que Iota 2 (Vincent *et al.*, 2022), Support Vector Machine (Christopher et Burges, 1998) ou encore le Random Forest (Salman *et al.*, 2024), la variabilité environnementale et la complexité des paysages caractéristiques des zones humides sahéliennes constituent des verrous méthodologiques qui restent difficiles à surmonter.

Les suivis par télédétection de ce type de paysage se concentrent souvent sur une ou plusieurs unités paysagères, notamment l'eau libre qui est la plus facile à discriminer et qui détermine l'extension des autres unités paysagères (Delclaux *et al.*, 2010 ; Yalikun *et al.*, 2019 ; Boukougou *et al.*, 2024 ; Chouto *et al.*, 2025).

Peu d'études ont cherché à préciser l'occupation du sol et son évolution, ou elles l'ont fait à des échelles plus grossières (Diedhiou *et al.*, 2020 ; Faye *et al.*, 2024, Badji *et al.*, 2025). Pour le lac Tchad, (Lemenkova, 2023) a utilisé plusieurs indices de végétation calculés sur des images Landsat pour définir des classes d'occupation des sols et suivre leur évolution depuis 2013. Malgré une programmation complexe sur GRASS GIS et une étendue importante couverte par des images Landsat, l'absence de contrôle terrain ne permet pas de préciser les erreurs de classification ni de réaliser des cartes d'occupation du sol à grande échelle. Toutefois, ces études récentes montrent la même tendance à l'augmentation des surfaces inondées que celle que nous observons pour le Fitri, ainsi qu'une progression des superficies cultivées. Par ailleurs, le pourcentage élevé de pixels bien classés ne garantit pas la précision de la classification dans cette zone très fragmentée avec l'utilisation d'une seule méthode de classification. Par exemple pour l'estuaire du Cameroun qui juxtapose mangrove, forêt dense, zones humides, constructions, agriculture et forêt dégradée, (Njutapvouli *et al.*, 2021) ont obtenu une précision globale de 98,76%, cependant des confusions sont observées entre les classes dont les densités des arbres de plantation changent selon la saison sèche ou pluviale.

Dans le bassin du lac Tchad, la culture du sorgho repiqué en contre-saison, réalisée à l'amorce de la décrue, présente deux difficultés majeures pour une cartographie exhaustive. D'abord, les densités de repiquage sont très faibles, entraînant des réponses spectrales de la végétation, même en période d'activité chlorophyllienne intense, très faible, se rapprochant du sol nu. De plus, la période de repiquage s'étale sur près de deux mois, il devient alors difficile d'identifier la date idéale d'observation par satellite, les premiers plants se dessèchent alors que les derniers sont tout juste repiqués et que la végétation aquatique continue de se développer. Pour cela, une méthode de vérification terrain rigoureuse s'impose, avec de nombreux points de contrôle.

Ce besoin de mieux contrôler les résultats des classifications par rapport à la vérité terrain est un enjeu que les télédéTECTEURS se posent depuis longtemps. L'analyse des avantages et inconvénients de différentes méthodes de classifications en télédétection montre que la plupart des méthodes sont complémentaires, d'où l'intérêt d'en utiliser plusieurs afin d'en améliorer la précision (El Kharki *et al.*, 2015), en fonction du paysage et des résolutions spatiales et temporelles des données à utiliser (Inoussa, 2019). Le recours à des corrections manuelles est parfois nécessaire, comme l'ont proposé (Traoré *et al.*, 2022) pour quantifier l'impact de l'orpaillage sur les ressources naturelles du site minier de Morila. Ces auteurs ont utilisé la classification par la méthode de maximum de vraisemblance couplée à un post-traitement manuel à cause de la fragmentation et la dégradation de la végétation.

Ainsi, quoique fastidieuse, l'insertion de la photo-interprétation dans une classification dirigée par la méthode de maximum de vraisemblance permet d'améliorer les résultats obtenus.

En comparaison, nous avons réalisé une autre classification, sur l'image de 2015, avec une seule méthode (maximum de vraisemblance ou minimum de distance) qui donne une superficie de 526 km² exploitées en cultures de décrue réparties sur toute la zone d'étude, ce qui englobe une bonne partie des sols nus et de la savane arbustive. L'ajout de la photo-interprétation post-classification montre que cette superficie n'est que de 385 km², répartie essentiellement à l'est, au nord et au sud du lac. Le même constat est fait sur les images de 2002 et 2022.

Dans cette zone lacustre où le milieu est très fragmenté avec les différents éléments d'occupation du sol qui s'imbriquent fortement les uns dans les autres, cette méthode améliore nettement les résultats. Sa reproductibilité impose cependant une très bonne connaissance du terrain, exhaustive et répétée dans le temps pour suivre les évolutions saisonnières et annuelles. La photo-interprétation a contribué à améliorer la classification en réduisant le nombre de pixels mal classés. Cependant, nous avons utilisé des images de deux satellites (Sentinel-2 et Landsat), ce qui induit des erreurs dues aux différences de capteurs et à la résolution spatiale. Les images d'archives de Sentinel-2 ne datent pas et ne sont disponibles qu'à partir de 2017, ce qui nous a conduit à utiliser des images Landsat pour les années 2002 et 2015. L'objectif étant de voir des changements à différentes dates, les images Landsat ne

sont pas ré-échantillonnées, ce qui sous-entend une détection plus fine avec l'image Sentinel-2, notamment l'exploitation des bandes de 10m de résolution spatiale par rapport aux images Landsat avec 30m.

4.2. La dynamique de l'occupation du sol

Les résultats des cartes d'occupation du sol montrent un paysage très dynamique, en constante évolution, avec des changements paysagers très rapides allant de 41% de la superficie étudiée pour la période de 2002 à 2015 à 47% pour 2015 à 2022.

Comme dans toutes les autres études de télédétection récentes sur les zones humides sahéniennes, les superficies en eau sont en constante augmentation depuis le début des années 2000 (Yalikul *et al.*, 2019 ; Boukougou *et al.*, 2024 ; Chouto *et al.*, 2025). Au Fitri, cette superficie a augmenté, pour les mois de février, de 211% passant ainsi de 120 à 252 km² sur la période de 2002 à 2022. Il faut rappeler les années exceptionnelles de 2020 et 2022, même si l'image choisie n'illustre pas ces années-là, puisque février 2022 reflète la crue de 2021. Cette année-là, le niveau d'eau était resté très haut et le parcellaire agricole était en train de se réadapter à ces nouvelles conditions d'inondation (Raimond *et al.*, 2024).

Les prairies marécageuses ont évolué en fonction de cette extension : leur localisation a beaucoup évolué bien que leur superficie n'ait progressé que de 19 km² sur la période. Des analyses en cours sur la base d'images Pleiades à très haute résolution permettent d'affiner la discrimination entre eau libre et végétation et aboutissent à des chiffres d'extension plus élevés de cette unité de paysage (Yalikul T. communication orale²). Les zones inondées se sont étendues et remplissent progressivement, en février, toute la cuvette du lac. Les observations des images satellitaires montrent également une inondation de plus en plus importante au nord-ouest du lac, entre Amdjaména Bilala et Wagna, ce qui a été montré par (Yalikul *et al.*, 2019), et qui s'est accentué depuis.

La prairie marécageuse du Fitri constitue une ressource majeure pour les systèmes pastoraux sahéniens au Tchad. La région du Fitri accueille en effet 75% des animaux de la zone sahénienne du Tchad pendant la saison sèche, de novembre à juin (Marty *et al.*, 2012). D'après les données du recensement général de l'élevage et au taux de croît annuel de 6,32% (Ministère Elevage et Productions Animales, 2017), on estime à près de 44,6 millions d'animaux, toutes espèces confondues, qui séjournaient au Fitri en 2022 pendant la saison sèche. A cette saison, la pression pastorale porte sur les îles et les rives du lac, mais également dans la savane arbustive du pourtour du lac. (Bécher *et al.*, 2019), dans leur analyse des ressources pastorales au Fitri,

observent un impact très important de la présence animale sur la végétation, aussi bien sur le plan quantitatif que qualitatif. La pression animale accentue la dégradation de la végétation naturelle du Fitri par le surpâturage, le piétinement et alimente le conflit d'accès aux ressources naturelles avec les agriculteurs et les pêcheurs. Ainsi les formations végétales régressent de façon importante causant un déséquilibre entre augmentation de la population et satisfaction des besoins par rapport aux ressources disponibles.

Au Fitri, les impacts du pastoralisme sur la végétation semblent s'observer dans la réduction de la disponibilité en pâturage aquatique dans le temps. Ils participent à la dégradation mesurée par télédétection de la savane arbustive en steppe (512 km² entre 2002 et 2015, puis 327 km² entre 2015 et 2022 ; représentant une moyenne de 2,7% de taux de conversion annuel sur les deux périodes). Ces dégâts semblent moindres dans les pâturages sahéniens au nord de Maradi au Niger (Souleymane *et al.*, 2025) où les régressions annuelles observées sont d'environ 1,3%. Les conclusions de cette dernière étude insistent sur la dégradation et la réduction des potentialités des ressources pastorales entre 1990 et 2022, dû à plusieurs facteurs dont le surpâturage et la mauvaise gestion de l'espace pastoral par les utilisateurs.

Au Fitri, les changements les plus importants semblent relever du domaine des cultures, qui sont en constante augmentation sur les 20 ans, que ce soit en culture pluviale ou de décrue (respectivement de 558 km² et de 205 km² entre 2002 et 2022). En réalité, les changements paysagers touchent une plus grande partie de l'espace en raison de la très grande mobilité du parcellaire, notamment pour les cultures pluviales. Ainsi, entre 2002 et 2015, cette superficie augmente de 483 km², mais dans le même temps, la steppe et savane arbustive converties en culture couvrent respectivement 485 km² et 312 km², et les cultures pluviales converties en steppe et en savane arbustive 414 km² et 312 km² respectivement. La mobilité du parcellaire de décrue est grande également, mais dans des proportions moindres car limitées par l'extension des vertisols. Cette mobilité constitue une adaptation du système de production à la variabilité environnementale (Raimond *et al.*, 2024).

L'extension du parcellaire agricole se fait principalement dans la steppe, pour les cultures pluviales, et dans les forêts d'acacia ou la savane arbustive pour les cultures de décrue. Ainsi, ce sont ces deux unités de paysage qui perdent le plus de superficie. Le secteur d'Abourda, au sud-est du lac, connecté au réseau routier de Bokoro vers la capitale N'Djamena, est le secteur où l'extension des cultures pluviales est le plus spectaculaire.

La tendance générale à l'augmentation du parcellaire agricole se confirme dans toute la zone sahénienne (Sidibé *et al.*, 2024). Au Fitri, elle semble liée à l'amélioration de la pluviométrie et à l'augmentation de la population. En effet, les données climatiques nationales montrent une pluviométrique en constante augmentation, malgré les variations interannuelles observées (figure 2). Ainsi les précipitations moyennes du Fitri sont passées de 385 mm en moyenne entre 1970-1999, à 419 mm entre 2000-2017 puis 733 mm entre 2018-2022. Faute de suivi

² Cette étude, non publiée, porte sur des analyses d'images pendant la période de crue (novembre) et estime la superficie de prairie marécageuse à 300 à 400 km² en 1970-80 ; entre 600 et 900 km² entre 2011 et 2015 ; 2 500 km² en 2020.

régulier, nous ne disposons pas des données sur la crue de la rivière Batha dont les crues sont plus importantes, comme en atteste aussi l'observation des images satellitaires en période d'arrivée de la crue (août). Quant à la population humaine, elle est passée de 116 000 en 2009 à plus de 168 000 habitants en 2022, ce qui représente une augmentation d'environ 72% en 13 ans. Ainsi, les superficies cultivées ont augmenté, même les zones marginales sont mises en cultures quand les conditions climatiques le permettent. Entre 2015 et 2022, le taux moyen annuel d'expansion agricole des cultures de décrue est de 3 % et celui des cultures pluviales est 0,88% car les crues élevées favorisent l'extension des zones de cultures de décrue mais limitent celles des cultures pluviales au lac Fitri. Sur cette période, cette augmentation représente 21% pour les parcelles de décrue et 6% pour les cultures pluviales, soit un total de 27% pour l'ensemble des zones culturales. Ces données se rapprochent à celles obtenues dans d'autres zones sahéliennes qui rapportent une augmentation des zones de cultures de 59,09% sur 32 ans entre 1990 et 2022 (Souleymane *et al.*, 2025).

La forêt claire est minoritaire dans le paysage, son évolution très contrastée en fonction des périodes. Cette dynamique semble liée aux conditions de l'inondation, d'une part, et à l'intensité des défrichements pour l'agriculture, d'autre part. Les enquêtes de terrain relèvent qu'un peuplement dense de *Hyphaene thebeica* est apparu après 1985 au nord-ouest du lac, entre Amdjaména Bilala et Wagna. Cette formation était déjà visible en 2002 (figure 12), puis en très forte expansion en 2015 (figure 13). Même si ce peuplement se maintient à ce jour, il est en très forte régression, ce que montre la figure 14. Cette dégradation est probablement due à l'effet combiné d'une inondation trop excessive, dans cette zone où l'inondation est de plus en plus haute et durable dans la saison, mais aussi en raison des défrichements pour la culture maraîchère et la multiplication des campements saisonniers pour la pêche, l'élevage et l'agriculture qui augmentent les prélèvements et les risques d'incendie. Le taux de dégradation de la forêt claire mesuré au Fitri (-61% de sa superficie entre 2015 et 2022) est très élevé comparé à d'autres études dans des zones forestières au Bénin par exemple, où (Adessé *et al.*, 2023) ont estimé la diminution des ressources naturelles de -10,5% en 20 ans sous la pression anthropique. Il faut nuancer nos résultats, cependant, en rappelant que cette unité de paysage est celle qui couvre la plus faible superficie et qu'elle est la plus difficile à discriminer en raison de la présence de l'eau (forêts inondables) et de sa confusion avec la savane arbustive dense. Notons qu'elle est l'unité paysagère où la proportion de pixels mal classés est la plus haute. Une cartographie plus fine serait nécessaire pour mieux localiser les massifs forestiers, notamment au sud-ouest du lac qui correspond à un parcours de transhumance pour une petite population d'éléphants en provenance de la zone de Melfi.

L'exploitation minière, à travers l'orpaillage artisanal, presque clandestin, est opérationnelle au Fitri depuis 2015 (Moutedé-Madji et Tchouki, 2025). Les études quantifiées de la dégradation des ressources naturelles

par cette activité ne sont pas encore disponibles pour le Fitri. Cependant, les études menées dans d'autres espaces montrent que les conséquences environnementales sont rapides. Ainsi, (Traoré *et al.*, 2022) ont observé dans l'étude des trois sites miniers du Mali, une diminution de 5,8% de savane arborée et une proportion de 25% de sol faiblement couvert au profit de l'exploitation minière en 20 ans, entre 1999 et 2019. Ils en déduisent que l'exploitation minière conduit à une végétation fragmentée et dégradée, ce qui pourrait bien être le cas dans la partie sud-est du lac Fitri où se déploient les puits d'orpaillage semi-artisanal et où la savane arbustive a fortement régressé au profit de la steppe.

Par ailleurs les lois qui encadrent la gestion des ressources naturelles et les modes de gestion traditionnelle ne sont pas bien appliquées par les utilisateurs, conduisant à la dégradation de ces ressources. Selon l'étude sur l'analyse critique de la dynamique spatio-temporelle au Burkina Faso (Guiatin, 2025), la déforestation est induite par des pressions anthropiques et la difficulté de mise en œuvre de gestion durable confrontée aux faiblesses institutionnelles, juridiques, financières et une gouvernance locale peu inclusive. Selon (Tapsoba *et al.*, 2023), les facteurs démographiques, environnementaux et climatiques sont des menaces pesant sur les efforts de gestion des zones humides. Il est temps que le lac Fitri, classé zone humide d'importance internationale par la convention Ramsar depuis 1990 et Réserve de biosphère nationale puisse disposer des moyens adéquats pour une bonne gestion de ses ressources naturelles.

5. Conclusion

Cette étude a permis de confirmer que la variabilité et la fragmentation du milieu du lac Fitri est telle qu'il n'est pas aisé de cartographier toutes les entités essentielles, notamment les cultures de décrue, à l'aide d'une seule méthode de classification dirigée en télédétection. Malgré une connaissance fine du terrain avec de nombreux points GPS relevés pendant plusieurs années, il était nécessaire de combiner la classification de Maximum de vraisemblance à la photo-interprétation pour rendre fiable la cartographie de l'occupation du sol du Fitri.

Le contexte actuel du Fitri est marqué par une pluviométrie plus favorable que dans la période 1980-2000, même si ces dernières sont soumises à une variabilité interannuelle plus accentuée. Cette situation favorise le développement des ressources naturelles et devient une source d'attraction pour les populations humaines et animales vers cette zone humide au cœur du sahel tchadien. Huit (8) unités paysagères englobant les éléments essentiels du paysage du Fitri, ont été classifiées et évaluées en deux périodes de temps. La cartographie à trois dates (2002, 2015 et 2022) illustre la rapidité des recompositions paysagères face à l'augmentation de la pluviométrie et des pressions démographiques et pastorales. Elle a permis de localiser les ressources et de quantifier les changements à trois dates. Les résultats alertent sur un déboisement accéléré par les mises en cultures, le pastoralisme et l'orpaillage.

Elle met en lumière la rapidité des changements mais aussi leur importance par le passé, notamment lors des grandes périodes de sécheresses dans le sahel où le paysage avait déjà fortement évolué.

Les résultats appellent à la poursuite des recherches sur des méthodes de classification mieux adaptées aux contextes de zones humides sahéliens fragmentés et très variables. Des recherches pluridisciplinaires sont indispensables pour aborder les questions d'aménagement afin de repérer et anticiper les zones à risque d'inondation pour les habitats et les cultures, prévoir et localiser les infrastructures (éducatives, routières, hydrologiques et de santé) et pour identifier les zones les plus conflictuelles par rapport au foncier en conséquence des modifications de parcelles de cultures de décrue, des parcours et des axes de transhumances. Ce suivi par la recherche pluri-disciplinaire, associant les sciences humaines aux sciences de la terre et de la vie (climatologie, hydrologie, écologie, agronomie), est indispensable à l'appui d'un projet de développement intégré du territoire, comme celui dont l'étude de faisabilité est en cours dans le cadre de l'Agence française de développement et ardemment demandé par les populations du Fitri.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Laboratoire Mixte International (LMI-VIABELEAUX) pour le financement pour les collectes de données de terrain dans le cadre de son Observatoire Homme-milieu du socio-écosystème du Fitri, ainsi que l'Ambassade de France au Tchad pour le financement du séjour scientifique à l'UMR 8586 PRODIG pour le traitement des données.

Références

Adesse H.N., Vodounou J-B.K. et Medeton B. (2023). Dynamique d'occupation des sols des zones humides de la commune de Ouessè (Bénin). <https://edition-efua.acaref.net/wp-content/uploads/sites/6/2023/11/Hippolyte-Nonvide-ADESSE.pdf>

Arouna O. (2012). Cartographie et modélisation prédictive des changements spatio-temporels de la végétation dans la Commune de Djidja au Bénin : implications pour l'aménagement du territoire. Thèse de doctorat. Univ. d'Abomey-Calavi. 246 p.

Badji, O., Ceesay, A., Hackman, K.O. (2025). Geospatial Assessment of Three Decades of Shoreline Shifts and Two Decades of Vegetation Change in the Grand Salom Transboundary Wetland Complex, Senegal-The Gambia. *International Journal of Current Science Research and Review*, 8(10), pp. 5048-5061. DOI: <https://doi.org/10.47191/ijcsrr/V8-i10-18>

Béchir A. B., Mian-Oudanang K., Mahamat A.-H., Bourdjolbo T. (2019). La végétation pastorale du Lac Fitri. Etat des lieux et dynamique. Fitri (Chapitre 10. Pp 189 – 202) in RAIMOND, Christine (dir.) ; et al. Le Tchad des lacs : Les zones humides sahéliennes au défi du changement global. Nouvelle édition [en ligne].

Marseille : IRD Éditions, 2019 Disponible sur Internet : ISBN : 9782709927161. DOI : 10.4000/books.irdeditions.30450.

BEGC (2016). Etude Diagnostique de la diversité biologique de la Réserve de Biosphère du lac Fitri. Rapport d'étude. 82p.

Bernier B. (1992). Introduction à la macroéconomie. Dunod, Paris, 217 p

BIEP (1989). Etude de développement rural intégré du Lac Fitri. Document de synthèse. Bureau Interministériel d'Etudes et de Programmation, Mars 1989. 26p.

Bonkoungou, Benjamin, Aymar Yaovi Bossa, Johannes van der Kwast, Marloes Mul, and Luc Ollivier Sintondji. (2024). "Inner Niger Delta Inundation Extent (2010–2022) Based on Landsat Imagery and the Google Earth Engine" *Remote Sensing* 16, no. 11: 1853. <https://doi.org/10.3390/rs16111853>

Campedel M. (2005). Classification supervisée. Support de cours accessible sur www.tsi.enst.fr/Campedel

Cherel J.P. (2010). Classification d'image de télédétection. Support de cours M1 SIIG3T. Traitement d'image. 13 p

Chalifoux S., Nastev M., Lamontagne C., Latifovic R., Fernandes R. (2006). Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellitaire landsat en hydrogéologie. *Télédétection*, 2006. 6 (1) : 9-17.

Chouto, S., Dassou, E., Doua, S., Gonne, B., Annavaï, N., Fotso-Nguemo, T. and Kolaouna-Labara, B. (2025). Hydrological Variability in the Yaéré Floodplain (1984-2024): A Landsat-Based Remote Sensing Study of Surface Water Dynamics under Climate Change. *Advances in Remote Sensing*, 14, 170-187. doi: [10.4236/ars.2025.143011](https://doi.org/10.4236/ars.2025.143011).

Christopher J.C. Burges, A 1998. Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition, *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2, 121–167 (1998)

Clément B., Hubert-Moy L, Rapinel S. (2008). Evaluation des fonctions des zones humides à partir de données de télédétection à très haute résolution spatiale. Application expérimentale à la Basse Vallée de la Dordogne. Rapport d'étude ECOBIO-CAREN COSTEL. Universités de Rennes 1 et 2, janvier 2008. 92 p.

Congalton R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37: 35-46.

Delclaux F., Haas E. & Rouche N. (2010). Satellite monitoring of Yaere flood plain dynamics (north Cameroon) https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers15-08/010055004.pdf

Descroix L., Diongue Niang A., Dacosta H., Panthou G., Quantin G. Et Diedhiou A., (2013). L'évolution des

- pluies de cumul élevé et recrudescence des crues depuis 1951 dans le bassin du Niger Moyen. *Climatologie*, vol. 10 (2013) Article disponible sur le site <https://climatologie.edpsciences.org> ou <https://doi.org/10.4267/climatologie.78>.
- Diédhiou I., Mering C., Sy O. et Sané T. (2020). Cartographier par télédétection l'occupation du sol et ses changements. Application à l'analyse de la dynamique des paysages forestiers sénégalais entre 1972 et 2016. <https://journals.openedition.org/echogeo/20510>
- El Kharki O., Mechbouh J., Ducrot D., Rouchdi M., Ngono J.M. (2015). Panorama sur les méthodes de classification des images satellites et techniques d'amélioration de la précision de la classification. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*. N° 210 (avril 2015).
- Faye, M., Tine, D., Niang, G. et Faye, G. (2024). Cartographie du couvert végétal et des zones humides de la région de Dakar (Sénégal) à l'aide des images Sentinel-2 et Landsat 8 OLI. *NAAJ. Revue africaine sur les changements climatiques et les énergies renouvelables*, 3(1), en ligne. DOI : 10.46711/naaj.2024.3.1.4
- Fotsing E., Mainam F. (2002). Dynamique du sorgho de contre saison et potentialités des sols en zone de savane de l'Extrême-Nord du Cameroun In Jamin J.Y., Seiny Boukar L. (éds.) : *Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis*. Actes du colloque, mai 2002 Garoua, Cameroun. Prasac 7 p
- Girard M.C. et Girard C.M., (1999). *Traitement des données de télédétection*. Dunod, Paris, 529 p.
- Guiatin E. (2025). Analyse critique de la dynamique spatio-temporelle des écosystèmes forestiers au Burkina Faso (Afrique de l'Ouest) : tendances, facteurs et enjeux pour la conservation de la biodiversité (une revue). *Revue Ecosystèmes et Paysages*, 5(1):1-17pp, e-ISSN (Online): 2790-3230. doi: <https://doi.org/10.59384/recopays.tg5115>
- Inoussa Toko Mouhamadou (2019). Changements de l'occupation des Terres dans la Forêt Classée des Monts Kouffé et sa Périphérie Sud au Bénin (1986-2006). *European Scientific Journal* March 2019 edition Vol.15, No.9 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857-7431. Doi: 10.19044/esj.2019.v15n9p478 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2019.v15n9p478](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2019.v15n9p478)
- INSEED (2012). Institut National de la Statistique, des Études Économiques et Démographiques, Deuxième Recensement Général de la Population et de l'Habitat «Résultats globaux définitifs», Ministère du Plan, de l'Économie et de la Coopération Internationale, N'Djamena, mars 2012, 199 p.
- Kauth, R. J. and Thomas, G. S. (1976). The Tasseled Cap — a graph description of the spectral temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Machine Processing of Remote Sensed Data*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, pp.4B41-4B51, 1976
- Kemsol Nagomgar A. (2018). Analyse de la dynamique spatiale des cultures de décrue dans les zones lacustres soudano-sahéliennes de 1985 à 2015 : cas des lacs Fitri et Iro au Tchad. Thèse de doctorat, université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody. 202 p.
- Kemsol Nagomgar A., Raimond C., Madjigoto R., Jofack Sokeng V., Djimassal D., Libar J., Kouamé K.F. (2019). Fluctuation des récoltes de sorgho repiqué et potentialités de culture. Une analyse par télédétection dans la région du lac Fitri (Chapitre 9. Pp 177 – 187) in RAIMOND, Christine (dir.) ; et al. *Le Tchad des lacs : Les zones humides sahéliennes au défi du changement global*. Nouvelle édition [en ligne]. Marseille : IRD Éditions, 2019 Disponible sur Internet : ISBN : 9782709927161. DOI : 10.4000/books.irdeditions.30450.
- Lemenkova P. (2023) : Using open-source software GRASS GIS for analysis of the environmental patterns in Lake Chad, Central Africa *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment* Volume 74, Issue 1, 49–64, 2023. DOI: 10.2478/boku-2023-0005 ISSN: 0006-5471 online, <https://content.sciendo.com/view/journals/boku/boku-overview.xml>
- Lemoalle J., Magrin G. (dir.), (2014). *Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles*. Marseille, IRD Éditions, coll. Expertise collégiale, 21 © IRD, 2014 ISSN : 1633-9924 ISBN : 978-2-7099-1836-7 p + clé USB.
- Mane L.K. et Fraval P. (2001). Suivi par télédétection des cultures de décrue dans la vallée du fleuve Sénégal en saison froide 2000/ 2001. *SAED/IWMI/ADRAO*. 30 p.
- Marty A., Zakinet D., Khamis D. D., Bernard C. (2012). *Almy Al Afia 2, Analyse de l'évolution des ressources dans le département du Fitri, République du Tchad* : Programme d'Hydraulique pastorale au Tchad central Phase II, Antea-Iram, 128 p.
- Ministère de l'élevage et des productions animales du Tchad (2017). *Recensement Général de l'Élevage : RGE 2012-2015. Principaux résultats définitifs*. Disponible en ligne sur : <https://fr.scribd.com/document/488241072/Recensement>
- Moutedé-Madji V. et Elias O. Tchouki E.O. (2025). Orpaillage et recomposition des systèmes d'activités rurales au sud-ouest du Tchad, *EchoGéo* [En ligne], 71 | 2025, mis en ligne le 31 mars 2025. URL : <http://journals.openedition.org/echogeo/28892> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/140dw>

- Njutapvouï F. N., Onguene R., Rudant J-P. (2021). Evaluation du potentiel des séries d'images multi-temporelles optiques et radar des satellites Sentinel 1 et 2 pour le suivi d'une zone côtière en contexte tropical: cas de l'estuaire du Cameroun pour la période 2015-2020. *Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection* Volume 223 (année 2021), numéro Spécial Afrique, <https://doi.org/10.52638/rfpt.2021.586>
- Pias J. et Poisot P. (1965). Carte pédologique de reconnaissance au 1/200 000. Feuille de Bokoro, Guéra, Mongo. Paris ORSTOM, 146 p
- Pontius Jr. R. G., (2000). Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66 (8) : 1011-1016.
- Raimond C. (1999). Terres inondées et sorgho repiqué : évolution des espaces agricoles et pastoraux dans le bassin du lac Tchad. Thèse de Doctorat, Université Paris I. 580 p.
- Raimond C., Range C., Reoundji F. (2014). "Le dynamisme des agricultures au Lac" In Lemoalle J., Magrin G. (dir.) : Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles, Marseille, IRD Editions, coll. Expertise collégiale, 254-311 (clé USB).
- Raimond C. (dir.), *et al.* (2019). Le Tchad des lacs : Les zones humides sahéliennes au défi du changement global. Nouvelle édition [en ligne]. Marseille : IRD Éditions, (2019). Disponible sur Internet : [Le Tchad des lacs - IRD Éditions.](https://doi.org/10.5281/zenodo)
- Raimond C., Bémadji B., Ndoutorlengar M., (2024). Dérèglement climatique et zones humides au sahel : une accélération des départs en migration ? *Herodote*, 195 : 201-222.
- Rouse, J.W., Hass, R.H., Schell, J. A., Deering, D. W., Harlin, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement of natural vegetation, NASA/GSCF Final Report, Greenbelt, MD: 371, 1974.
- Salman H.A., Kalakech A., & Steiti A. (2024). Random Forest Algorithm Overview. *Babylonian Journal of Machine Learning*, 2024, 69-79. <https://doi.org/10.58496/BJML/2024/007>
- Sidibé M., Aoudji A.K.N, Moumouni Y.I., Sacko I., Saliou I., Koné B., Assogbadjo A.E., Zannou A., (2024). Dynamiques Spatio-Temporelles de l'Occupation des Terres dans les Zones de Production Cotonnière et Céréalière au Mali, *Revue Internationale de Géomatique*, Volume 33, 2024, Pages 51-76, ISSN 1260-5875, <https://doi.org/10.32604/rig.2024.045505>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S126058752400001X>)
- Souleymane A.D., Aboubacar A., Nassirou A.M. et Garba I. (2025). Dynamique spatio temporelle d'occupation du sol dans la zone agropastorale de la commune de Korahane, centre Nord de la république du Niger. *ESI Preprints*. <https://doi.org/10.19044/esipreprint.2.2025.p155>
- Tapsoba A., Sawadogo L. et Sanou J. (2023). Préservation et Gestion Durable de la Zone Humide de Bagré : Analyse des Enjeux, Menaces et Défis Pour la Conservation de l'Ecosystème. *European Scientific Journal*, ESJ, 19 (36), 148. <https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n36p148>
- Traore S.S., Dembele S., Dembele D., Diakite N. et Diakite C.H. (2022). Dynamique de l'occupation du sol et trajectoire du couvert végétal autour de trois sites miniers du Sud Mali entre 1988 et 2019 p. 151-166 <https://doi.org/10.4000/physio-geo.14565>
- Vincent, Arthur, Inglada, Jordi, & Peña Luque, Santiago. (2022). Sahel Land Cover OSO 2018 [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo>.
- Yalikun T., Raimond C., Kemsol Nagorngar A., Zakinet D., Schuster M., Sylvestre F., (2019). Variabilité des crues et des paysages du lac Fitri depuis les grandes sécheresses des années 1970-1980. Chapitre IRD 99-119. In RAIMOND, C. (dir.) ; *et al.* Le Tchad des lacs : Les zones humides sahéliennes au défi du changement global. Nouvelle édition [en ligne]. Marseille : IRD Éditions, 2019. Disponible sur Internet : [Le Tchad des lacs - IRD Éditions.](https://doi.org/10.5281/zenodo)