

Analyse par Télédétection de la dynamique des formations végétales 2002-2022 dans le Sud du Parc national de la Comoé (Nord-Est de la Côte d'Ivoire)

Konate Alassane

Laboratoire de Pédologie et Agriculture Durable,
UFR Sciences de la Terre et des Ressources Minières,
Université Felix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire

Dibi N'da Hyppolite

Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection,
Université Felix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire

Bongoua-Devisme Affi Jeanne

Laboratoire de Pédologie et Agriculture Durable,
UFR Sciences de la Terre et des Ressources Minières,
Université Felix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire

[Doi:10.19044/esj.2026.v22n3p124](https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n3p124)

Submitted: 01 October 2025

Accepted: 05 January 2026

Published: 31 January 2026

Copyright 2026 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Konate, A., Dibi, N.H. & Bongoua-Devisme, A.J. (2026). *Analyse par Télédétection de la dynamique des formations végétales 2002-2022 dans le Sud du Parc national de la Comoé (Nord-Est de la Côte d'Ivoire)*. European Scientific Journal, ESJ, 22 (3), 124.

<https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n3p124>

Résumé

Le Parc National de la Comoé, situé au nord de la Côte d'Ivoire, est un écosystème riche mais soumis à des pressions anthropiques et climatiques malgré son statut protégé. Cette étude analyse l'évolution de l'occupation du sol dans la moitié sud du parc entre 2002, 2012 et 2022, à partir d'images satellitaires LANDSAT. La méthodologie, validée ($Kappa > 0,77$), s'appuie sur une analyse de la dynamique spatio-temporelle par imagerie LANDSAT datant de 2002, 2012 et 2022. L'étude de la dynamique végétale dans la partie sud du Parc National de la Comoé (2002-2022) révèle deux phases contrastées. Il apparaît que la période de crise (2002-2012) a entraîné une érosion de la biodiversité forestière, avec un déclin de -51% des forêts denses et de -20% des forêts claires/savanes boisées, et une savanisation accélérée du paysage. Avec le retour d'une gestion effective (post 2012), un rétablissement notable

des formations forestières, est observé, avec des gains substantiels de superficie : Les savanes arborées ont manifesté la progression la plus remarquable, avec une expansion de 29,0% sur la décennie, atteignant 27,63% de la zone d'étude en 2022. Sur l'ensemble de la période (2002-2022) les savanes arbustives ont affiché la plus grande stabilité (89,6%) alors que les formations forestières ont quant à elles subi plus de mutations, accompagnée d'une légère augmentation des sols nus attestant des pressions anthropiques et climatiques. Par ailleurs, le réseau hydrographique a considérablement augmenté, illustrant des changements structurels importants. Ces résultats reflètent l'influence combinée de facteurs naturels et humains. Malgré une résilience certaine, la fragmentation des habitats et les pressions persistantes imposent une gestion intégrée, notamment la restauration des corridors écologiques et la gestion des feux, pour assurer la conservation biologique à long terme.

Mots-clés: Télédétection, Dynamique, mutations végétales, Parc National de la Comoé, résilience écologique

Remote Sensing Analysis of the Dynamics of Vegetation Formation Changes from 2002-2022 in the Southern of Comoé National Park (Northeastern Côte d'Ivoire)

Konate Alassane

Laboratoire de Pédologie et Agriculture Durable,
UFR Sciences de la Terre et des Ressources Minières,
Université Felix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire

Dibi N'da Hyppolite

Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection,
Université Felix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire

Bongoua-Devisme Affi Jeanne

Laboratoire de Pédologie et Agriculture Durable,
UFR Sciences de la Terre et des Ressources Minières,
Université Felix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire

Abstract

Comoé National Park, located in the northern Côte d'Ivoire, is a rich ecosystem but faces anthropogenic and climatic pressures despite its protected status. This study analyzes land use changes in the southern half of the park between 2002, 2012, and 2022, using LANDSAT satellite images. The methodology, validated with a Kappa index greater than 0.77, is based on a

spatio-temporal dynamic analysis of LANDSAT imagery from 2002, 2012, and 2022. The study of vegetation dynamics in the southern part of Comoé National Park (2002-2022) reveals two contrasting phases. The crisis period (2002-2012) led to a decline in forest biodiversity, with a 51% decrease in dense forests and a 20% reduction in open forests/wooded savannas, accompanied by accelerated savannization of the landscape. Following the return of effective management (post-2012), a notable recovery of forest formations was observed, with substantial gains in area: wooded savannas showed the most remarkable increase, expanding by 29.0% over the decade to cover 27.63% of the study area by 2022. Over the entire period (2002-2022), shrub savannas showed the greatest stability (89.6%), while forest formations experienced more changes, along with a slight increase in bare soils, indicating ongoing anthropogenic and climatic pressures. Additionally, the hydrographic network significantly expanded, illustrating important structural changes. These results reflect the combined influence of natural and human factors. Despite some resilience, habitat fragmentation and persistent pressures require integrated management, including restoration of ecological corridors and fire management, to ensure long-term biological conservation.

Keywords: Remote sensing, Dynamics, Vegetation changes, , Comoé National Park, ecological resilience

Introduction

Le Parc National de la Comoé, situé au nord de la Côte d'Ivoire, constitue l'un des écosystèmes les plus riches et diversifiés d'Afrique de l'Ouest (Koueita *et al.*, 2018). Il se distingue par une mosaïque végétale complexe, allant des savanes ouvertes aux forêts denses, qui abrite plus des trois quarts des grands mammifères du pays (Yeo *et al.*, 2014). Ce haut niveau de biodiversité a valu au parc d'être inscrit au patrimoine mondial de l'UNESCO en 1983. Malgré son statut protégé, son intégrité a été sévèrement compromise par la crise politico-militaire que le pays a traversée de 2002 à 2011, comme l'ont rapporté Fauret *et al.*, (2024). Cette période a entraîné un effondrement du contrôle et de la gestion des aires protégées, offrant une triste opportunité d'étudier la réponse des écosystèmes à une perturbation anthropique majeure (UICN/BRAO, 2008).

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude qui a pour objectif d'améliorer les connaissances sur la dynamique des formations végétales. Il est question d'analyser des mutations végétales intervenues dans le Parc national de la Comoé au cours des vingt dernières années afin de fournir des bases scientifiques solides pour orienter les décisions de gestion durable et de renforcer la protection de la biodiversité du parc. Spécifiquement, il s'agit de 1) quantifier les mutations des formations végétales entre 2002 (période de

crise), 2012 (post-crise) et 2022 (rétablissement) ; 2) évaluer la résilience différentielle des forêts et des savanes et 3) proposer des recommandations de gestion fondées sur les tendances observées pour consolider la reprise écologique. Tout ce aura pour finalité de fournir des bases scientifiques solides pour orienter les décisions de gestion durable et de renforcer la protection de la biodiversité du parc.

Matériels et méthodes

Zone d'étude

Le Parc National de la Comoé (PNC), avec une superficie totale de 1 149 450 hectares, est localisé dans le Nord-Est de la Côte d'Ivoire. Cette aire qui est le plus grand parc de l'Afrique de l'Ouest est à cheval sur les régions administratives du Bounkani, du Tchologo et celle du Hambol suivant le dernier découpage administratif du pays en 2011. Il se localise plus précisément entre les latitudes 8°30' et 9°40' Nord et les longitudes 3°10' et 4°20'Ouest. Ce parc a été classé dès 1983 comme patrimoine mondial par l'UNESCO. Le PNC se trouve dans une zone de transition entre le domaine soudanien et sub-soudanien, le PNC présente une mosaïque unique d'écosystèmes de savane et de forêt (Kouassi *et al.*, 2014). Le fleuve Comoé dont le nom est porté par le Parc, traverse ce dernier du Nord au Sud sur près de 200 km et y constitue le principal cours d'eau. Avec un climat de type tropical subhumide, la couverture végétale du PNC est dominée par des formations savanicoles parsemées d'îlots de forêts sèches et humides dont la plus importante est la forêt galerie longeant le fleuve Comoé. Le relief dominant est le plateau dont les altitudes culminent autour de 300 mètres. La géologie de la zone est dominée par des schistes et micaschistes alignés suivant la direction Nord-Sud. Les principaux types de sols rencontrés sont ferrallitiques, ferrugineux et hydromorphes (Yeo *et al.*, 2014). Notre étude se concentre sur sa partie méridionale (8°30' et 9°00' Nord et 3°10' et 4°20'Ouest) couvrant 8105 26 ha qui capturent la diversité écologique caractéristique du PNC, incluant les formations de savanes dominantes, les îlots forestiers et forêts-galeries (Malan *et al.*, 2017). Cette zone d'étude représente un microcosme facile d'accès, pour analyser les dynamiques spatio-temporelles végétales dont le pédopaysage est soumis à d'importantes pressions anthropiques.

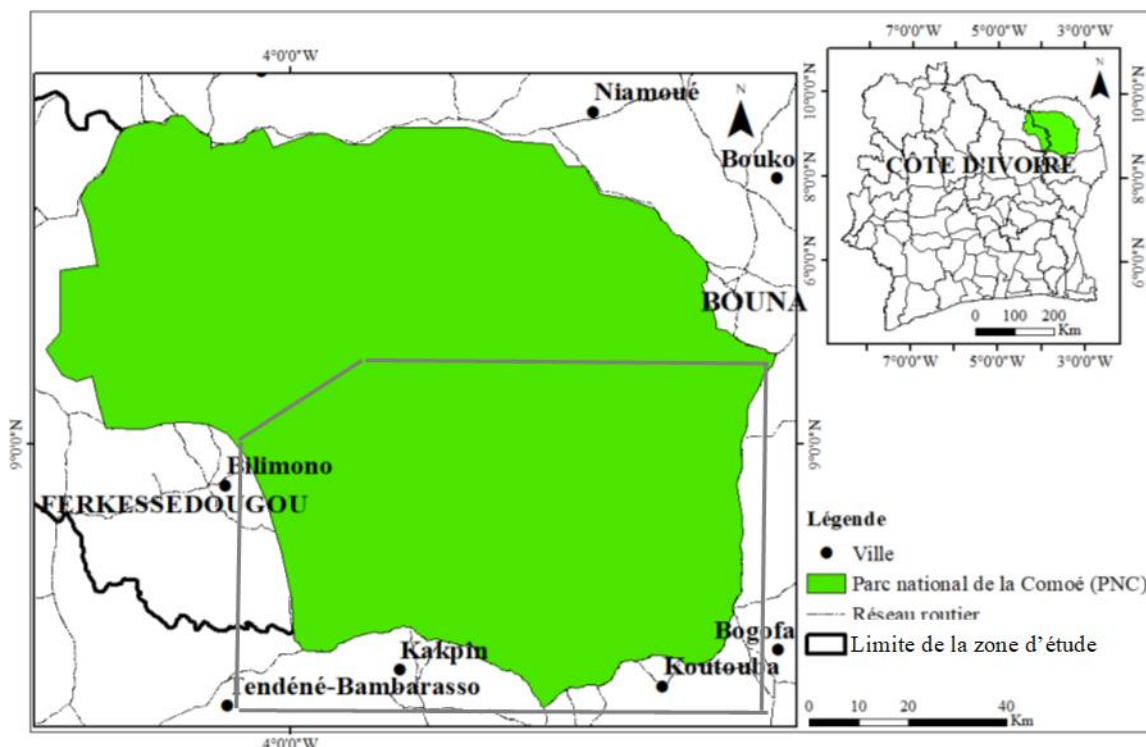


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude

Données et méthodes

Données spatiales

L'analyse de l'évolution de l'occupation du sol dans la région sud du Parc National de la Comoé (PNC) couvre une période de vingt ans, divisée en deux phases distinctes: la période précédant les crises (2002-2011) et celle suivant la fin des perturbations sociopolitiques (2012-2022). Les données spatiales utilisées proviennent principalement d'images satellitaires acquises lors de la saison sèche, période privilégiée pour sa capacité à discriminer les classes d'occupation du sol en raison des contrastes spectraux marqués. Les images de la saison sèche sont particulièrement adaptées pour différencier les zones anthropisées, telles que les cultures et les jachères, des formations végétales naturelles comme les forêts, en raison de la séparation spectrale nettement distincte qui caractérise cette période (Barima et al., 2009 ; Oszwald et al., 2010). De plus, les effets atmosphériques y sont atténués, ce qui améliore la qualité et la précision des classifications (Chander & Markham, 2003). Les principales données mobilisées incluent des sources cartographiques, satellitaires ainsi que des données collectées sur le terrain. Les images satellitaires Landsat 7 ETM+ (scènes 196-53 et 196-54) des 15/12/2002, 25/01/2012 et 20/01/2022 ont été sélectionnées. Le choix de la saison sèche procède d'une stratégie : celle qui facilite la discrimination des

classes de végétation, et les effets atmosphériques y sont atténués, améliorant la qualité des classifications (Chander et Markham, 2003, Barima et al., 2009 ; Oszwald et al., 2010).

Collecte de données de terrain pour entraîner l'algorithme de classification

Les images satellitaires Landsat ont été obtenues par téléchargement grâce au site www.landsatlook.usgs.gov. Les périodes de 2002-2012 et 2012-2022 correspondent respectivement à la période de crise militaro-politique qu'a connue la Côte d'Ivoire et à la reprise en main du PNC par l'OIPR.

Après téléchargement, les fenêtres d'étude centrées sur le PNC ont été extraites à partir d'images de niveau L2, déjà corrigées des effets atmosphériques et radiométriques. Sur les images prétraitées de 2022, une combinaison des bandes et une composition colorée ont été réalisées en utilisant à la fois les bandes brutes et les trois premiers néocanaux obtenus via une Analyse en Composantes Principales (ACP). Cette opération a permis de discerner, à travers une palette variée de colorations, les îlots forestiers, les formations forestières en galeries et/ou ripicoles, les forêts claires et savanes boisées, ainsi que les savanes arborées et arbustives. Par interprétation visuelle, les sols nus et les plans d'eau ont également été identifiés.

Un total de 150 points a ensuite été sélectionné pour être décrits sur le terrain, répartis de la manière suivante : forêt (35), forêt claire/savane boisée (25), savane arborée (35), savane arbustive (35), sol nu ou site habité (10) et plan d'eau (10). Les coordonnées géographiques de ces points ont été intégrées pour faciliter leur localisation précise lors du travail de terrain.

Les points présélectionnés ont été localisés puis décrits à l'aide d'une fiche de collecte de données. Les paramètres relevés comprenaient la structure (hauteur et recouvrement des strates ligneuses et herbacées), la biologie (espèces végétales dominantes, stade phénologique) et l'écologie (relief, drainage du sol, niveau de dégradation).

En complément, 200 points supplémentaires ont été directement collectés sur le terrain afin de valider les produits cartographiques. Ces points sont répartis comme suit; forêt (50), forêt claire/savane boisée (35), savane arborée (45), savane arbustive (50), sol nu ou site habité (10) et plan d'eau (10).

Production de la carte d'état des lieux 2022 des formations végétales du sud du Parc de la Comoé

Pour la classification supervisée, 120 points d'apprentissage ont été sélectionnés selon un plan d'échantillonnage stratifié visant à assurer une représentation optimale de chaque classe d'occupation du sol. Cette sélection, représentant 80% des points initialement collectés, a été optimisée pour

maximiser la séparabilité spectrale entre les classes tout en maintenant un équilibre interclasses. Cet algorithme, largement reconnu pour sa robustesse (Koné, 2021), a permis de générer la carte d'occupation du sol de 2022 pour la zone sud du Parc National de la Comoé.

La carte produite a ensuite été validée par une analyse de précision basée sur une matrice de confusion issue des données de contrôle. La carte est considérée comme validée lorsque le coefficient Kappa est supérieur à 0,50 et la précision globale dépasse 80%. Une fois validée, la carte 2022 a été vectorisée puis intégrée dans le logiciel ArcGIS 10.5 pour le calcul des superficies des différents types d'occupation du sol.

Production des cartes historiques de l'occupation du sol du Parc (2002 et 2012)

La méthodologie de traitement des images Landsat de 2012 et de 2002 est identique à celle appliquée en 2022. Cependant, pour l'entraînement de l'algorithme, seules les parcelles restées stables sur la période 2002-2022 ont été utilisées. Ce jeu de données comprend 99 points n'ayant pas connu de mutation et a servi de base pour la cartographie historique du sud du Parc National de la Comoé pour les années 2002 et 2012. Ces cartes ont ensuite été validées selon les mêmes critères de performance, à savoir un coefficient K_{appa} supérieur à 0,50 et une précision globale au moins égale à 80%. Une fois validées, elles ont été intégrées dans ArcGIS (version 10.5) pour le calcul des surfaces des différentes classes d'occupation du sol.

Analyse des mutations des formations végétales entre 2002 et 2022.

Les superficies des différents types d'occupation du sol ont été calculées pour les années 2002, 2012 et 2022. À l'aide du logiciel ArcGIS 10.5. À partir de ces données, une analyse quantitative des dynamiques des formations végétales a été réalisée en calculant les taux annuels d'accroissement ou de régression.

Un tableau de mutation a ensuite permis d'identifier les zones de stabilité végétale ainsi que celles où certaines formations ont été remplacées par d'autres. Cette analyse quantitative fournit, en définitive, un outil précieux pour évaluer l'efficacité de la protection du site, notamment par l'examen de la densification ou du déclin des formations végétales.

Resultats

Formations végétales observées sur le site d'étude

Le travail de terrain a permis de collecter plus de 350 points pour caractériser les différentes formations végétales. Les investigations montrent que les forêts et les savanes constituent les principales formations couvrant le sud du Parc National de la Comoé (PNC). Les peuplements forestiers sont des

formations végétales fermées, se manifestant sous forme d'îlots forestiers (Figure 2), de forêts-galeries bordant le fleuve Comoé (Figure 3), ou de forêts ripicoles le long des rivières. Les peuplements savanicoles, également fermés, se déclinent en savanes arborées (Figure 4), forêts claires/savanes boisées (Figure 5), savanes arbustives (Figure 6) et savanes herbeuses (Figure 7).

Les îlots forestiers, formations emblématiques du site, sont des peuplements fermés couvrant entre 50 et 70% du sol, contrastant avec les vastes espaces de savanes. Leur présence ne dépend pas nécessairement de la proximité des points d'eau. Localisées majoritairement dans le Sud du parc, ces forêts présentent une strate herbacée quasi absente et une strate ligneuse d'une hauteur comprise entre 10 et 15 mètres. Leur état de conservation varie (Figure 2).

Les forêts-galeries, situées le long du fleuve et de ses affluents, affichent une structure similaire aux îlots forestiers, avec une strate ligneuse plus basse autour de 10 mètres mais plus fermée (70 à 80% de recouvrement) et un meilleur état de conservation (Figure 3).

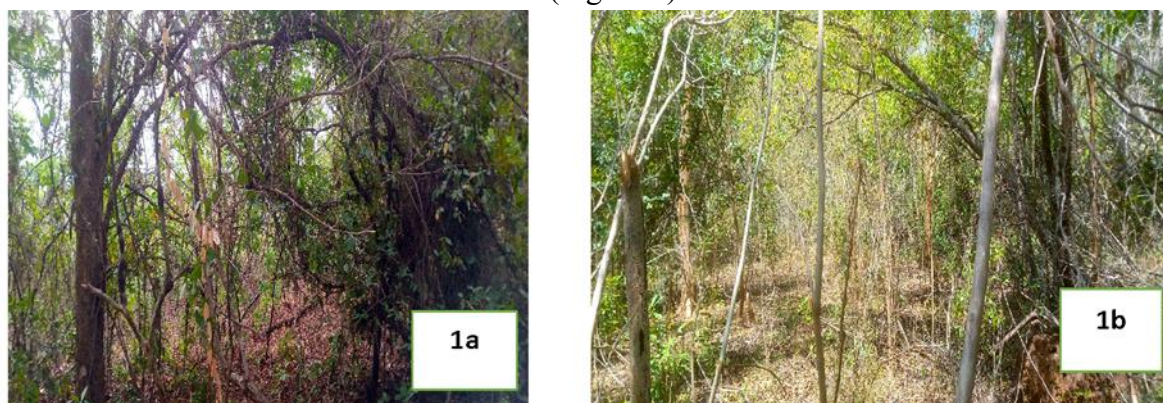


Figure 2 : Îlots de forêt : 1a (îlots forestiers conservés), 1b (îlots forestiers rajeunis) (Photo : Konaté, 2023)



Figure 3 : Forêt galerie aux rives de la Comoé (Photo : Konaté 2023)

Les savanes arborées du parc (Figure 4) se caractérisent par une strate ligneuse moins dense, avec un recouvrement plus faible allant de 10 à 20%, comparativement aux savanes boisées. En revanche, la strate herbacée est très développée, couvrant plus de 80% de la surface et dépassant généralement un mètre de hauteur. Cette strate est dominée par des espèces telles que *Andropogon gayanus*, *Andropogon chinensis*, ainsi qu'*Aframomum albobviolaceum* et *Aframomum latifolium*.

La strate ligneuse est quant à elle composée d'espèces comme *Berlinia grandiflora*, *Maytenus senegalensis*, *Piliostigma thonningii*, *Pleiocarpa mutica* et *Vittelaria paradoxa*.



Figure 4 : Savanes arborées de la Comoé : **3a** (savane arborée dense), **3b** (savane arborée moins dense) (photo : Konaté 2023)

Les forêts claire-savanes boisées (Figure 5) se distinguent des savanes arborées par une densité plus élevée de la strate ligneuse, avec un recouvrement de la canopée variant entre 30 et 50%. Cette canopée atteint une hauteur comprise entre 10 et 15 mètres. La strate herbacée est localement développée, contribuant à faire de cette formation une transition entre les forêts claires et les savanes arborées.

Parmi les espèces ligneuses dominantes, on trouve *Burkea africana*, *Daniellia oliveri*, *Vitellaria paradoxa*, *Afrormosia laxiflora*, *Isoberlinia doka* et *Lannea acida*. La strate herbacée est principalement constituée d'espèces telles que *Panicum phragmitoides* et *Hyparrhenia diplandra*.



Figure 5 : Savane boisée après passage de feu (Photo : Konaté 2023)

La savane arbustive (Figure 5) est majoritairement composée d'arbustes ne dépassant pas huit mètres de hauteur. Le tapis herbacé y est très dense et continu, avec les mêmes espèces que celles observées dans les savanes arborées. La strate arbustive est dominée par des espèces telles que *Detarium microcarpum*, *Terminalia avicennioides*, *Burkea africana* et *Vitellaria paradoxa*.

Les savanes herbeuses sont caractérisées par une très faible densité de la strate arbustive par endroits, où la strate herbacée est souvent absente en raison des incendies fréquents qui la consomment (Figure 7).



Figure 6 : Savanes arbustives : 6a (savane arbustive rajeunie après passage de feu), 6b (savane arbustive saine), (Photo : Konaté 2023)

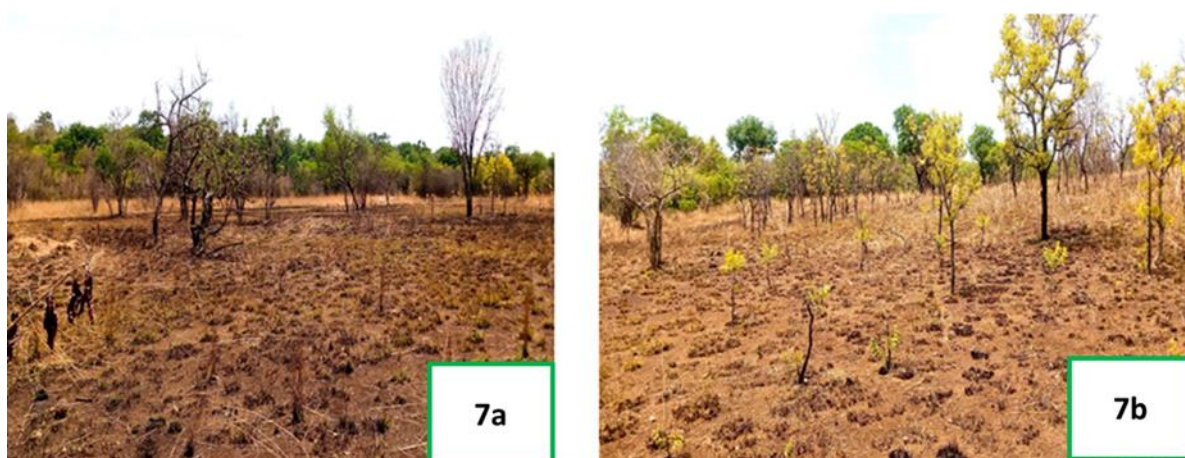


Figure 7 : Savanes herbeuses : 6a (après passage de feu), 6b (en mutation) (Photo : Konaté 2023)

Évolution du couvert végétal du Sud du Parc National de la Comoé à partir des images LANDSAT

Qualité des classifications des images LANDSAT entre 2002, 2012 et 2022

L'évaluation de la qualité des classifications pour les années 2002, 2012 et 2022 révèle des variations notables dans les performances des modèles utilisés (Tableau 1). En 2002, la classification atteint sa meilleure performance avec une précision de 90,83% et un indice de Kappa de 0,87. En 2012, on observe une baisse significative de la précision, qui passe à 83,90%, avec un indice de Kappa de 0,77. En 2022, une légère amélioration est constatée par rapport à 2012, avec une précision de 87,30% et un indice de Kappa de 0,82, indiquant un retour vers de meilleures performances. Malgré cette fluctuation, les résultats restent globalement satisfaisants.

En observant l'évolution des types de couvert végétal, l'on remarque une stabilité remarquable des zones d'eau dont la classification affiche une précision de 100% tout au long de la période étudiée (Tableau 2). En ce qui concerne les forêts, malgré une stabilité globale satisfaisante dans leur identification, des variations de précision sur la superficie ont néanmoins été constatées avec 44,27% en 2002, 25,56 % en 2012 et 43,85% en 2022. Les savanes boisées, quant à elles, présentent des fluctuations de précisions importantes avec 15,60% en 2002, 21,84% en 2012 et 21,26% en 2022. Les précisions sur les superficies des savanes arborées varient de 16,35% en 2002 à 11,02 % en 2012 et stabilise à 11,11% en 2022. Quant aux savanes arbustives, elles varient de 17,75% en 2002 à 49,51 % en 2012 et à 15,32% en 2022.

Tableau 1 : Matrice de confusion, précision globale et indice de Kappa pour les années 2002, 2012 et 2022 dans le Sud-Est du Parc National de la Comoé

2002, 2012 et 2022 dans le Sud-Est du Parc National de la Gômbé							
Classes	année	Forêt	Savbois	Savarbo	Savarbu	Sol nu	Eau
Forêt	2002	89,15	10,17	0,00	0,00	0,00	0,00
Savane boisée		10,85	83,57	0,00	0,00	0,00	0,00
Savane arborée		0,00	4,23	96,80	0,00	0,00	0,00
Savane arbustive		0,00	2,03	3,20	92,34	0,00	0,00
Sol nu		0,00	0,00	0,00	7,66	100,	0,00
Eau		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
		Précision globale : 90,832%					
		Coefficient Kappa : 0,7728					
		Forêt	Savbois	Savarbo	Savarbu	Sol nu	Eau
Forêt	2012	76,14	22,65	0,00	0,00	0,00	0,00
Savane boisée		23,77	77,50	0,88	2,49	0,00	0,00
Savane arborée		0,10	4,25	93,45	5,99	1,59	0,00
Savane arbustive		0,00	1,13	5,65	91,52	9,52	0,00
Sol nu		0,00	0,19	0,00	0,00	88,89	0,00
Eau		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
		Précision globale : 83,897%					
		Coefficient Kappa : 0,7728					
		Forêt	Savbois	Savarbo	Savarbu	Sol nu	Eau
Forêt	2022	88,10	19,60	0,00	0,00	0,00	0,00
Savane boisée		11,80	79,24	8,00	0,00	0,00	0,00
Savane arborée		0,07	1,08	90,30	0,35	0,00	0,00
Savane arbustive		0,03	0,08	1,56	83,94	0,38	0,00
Sol nu		0,00	0,00	0,14	15,71	99,62	0,00
Eau		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
		Précision globale : 87,2978%					
		Coefficient Kappa : 0,8223					

Tableau 2 : Proportions des précisions de couverture par classe de végétation et de sol des images LANDSAT de 2002, 2012 et 2022

Paramètres	Précisions par classe	2002	2012	2022
Forêt	Producteur	89,15%	76,14%	88,10%
	Utilisateur	97,25%	93,18%	90,91%
Savane boisée	Producteur	83,57%	77,50%	79,24%
	Utilisateur	64,03%	52,41%	75,13%
Savane arborée	Producteur	96,80%	93,45%	90,30%
	Utilisateur	96,91%	77,20%	97,20%
Savane arbustive	Producteur	92,34%	91,52%	83,94%
	Utilisateur	97,79%	97,32%	98,57%
Sol nu	Producteur	100,00%	88,89%	99,62%
	Utilisateur	52,47%	91,80%	99,23%
Eau	Producteur	100,00%	100,00%	100,00%
	Utilisateur	100,00%	100,00%	100,00%
Principales confusions		2002	2012	2022
Forêt/Savane boisée		10,17%	22,65%	19,60%
Savane boisée/Savane arborée		4,23%	4,25%	1,08%

Savane arborée/Savane arbustive	3,20%	5,99%	0,35%
Proportions totales	2002	2012	2022
Forêt	44,27%	25,56%	43,85%
Savane boisée	15,60%	21,84%	21,26%
Savane arborée	16,35%	11,02%	11,11%
Savane arbustive	17,75%	49,51%	15,32%
Sol nu	3,03%	0,85%	6,97%
Eau	2,99%	1,21%	1,18%

Occupation du sol dans la partie Sud du PNC face aux pressions anthropiques

En 2002, le paysage du PNC est dominé par les formations de savanes, qui couvrent près de 97% de la superficie totale de la zone d'étude. Plus précisément, la savane arbustive occupe 68,1%, forêt claire/savanes boisée 7,20% 2,5% et les savanes arborées 21,42% (Tableau 3, Figure 9). Les sols nus et les surfaces en eau représentent moins de 1%, répartis respectivement en 0,68% et 0,15% (Tableau 3, Figure 9).

En 2012, la dynamique des types d'occupation du sol montre une diminution de la superficie des à 1,23 %, soit une baisse de 1,28% par rapport à 2002. Par ailleurs on note une régression des forêts claires/savanes boisées à 79,6% soit une baisse de 20,43 %. Les formations savaniques couvrent alors 97,9%, réparties entre savanes arbustives (69,6%) et savanes arborées (22,63%), forêt claire/savanes boisées (5,71%), tandis que les forêts représentent 1,23% de la zone étudiée. Par ailleurs, la superficie des sols nu atteint 0,70% alors qu'elle était de 0,68% en 2002 soit un gain (0,02%), alors que les zones en eau restent stables à 0,14%. Cette période illustre une transition progressive marquée par une augmentation des savanes arborées au détriment des forêts et des forêts claires/ savanes boisées (Tableau 3, Figure 10).

En 2022, la couverture des savanes arbustives et arborées diminue légèrement pour atteindre respectivement 67,9%, et 21,48%, par rapport 2012. On note une augmentation significative des couvertures forestières à +147% soit un gain de 47,1%, par rapport 2012. Les sols nus restent stables en 2022, tandis que les superficies en eau connaissent une hausse passant de 0,14% à 0,47%. La carte d'occupation du sol du Sud du PNC en 2022 (Tableau 3, Figure 11) illustre cette tendance d'expansion des formations arborées et forestières, avec une relative stabilité des formations des savanes arbustives.

Tableau 3 : Évolution des superficies de l'occupation du sol dans la partie Sud du Parc National de la Comoé entre 2002, 2012 et 2022. Les chiffres en parenthèses sont les superficies des formations (%) par rapport à la superficie totale

Occupation du sol	Aire 2002 (ha)	Aire 2012 (ha)	Aire 2022 (ha)
Forêt	14 278,20 (2,50 %)	7 023,30 (1,23 %)	10 328,05 (1,81 %)
Forêt claire / Savane boisée	41 014,40 (7,20 %)	32 632,63 (5,71 %)	43 569,20 (7,63 %)
Réseau hydrographique	864,90 (0,15 %)	812,05 (0,14 %)	2 709,80 (0,47 %)
Savane arborée	122 313,00 (21,42 %)	129 216,10 (22,63 %)	122 689,70 (21,48 %)
Savane arbustive	388 697,00 (68,06 %)	397 393,00 (69,59 %)	387 769,60 (67,90 %)
Sol nu	3910,81 (0,68 %)	4 001,23 (0,70 %)	4011,96 (0,70 %)
TOTAL (zone d'étude)	571 078,31 (100 %)	571 078,31 (100 %)	571 078,31 (100 %)

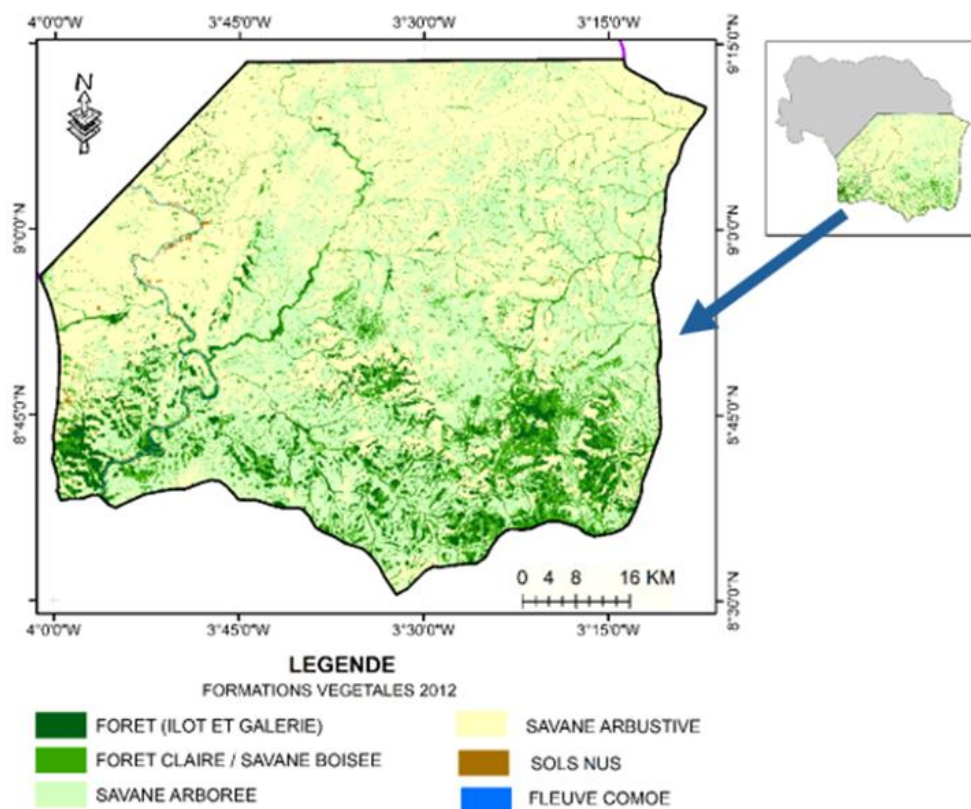


Figure 9: Carte d'occupation du sol du Sud du Parc National de la Comoé en 2002

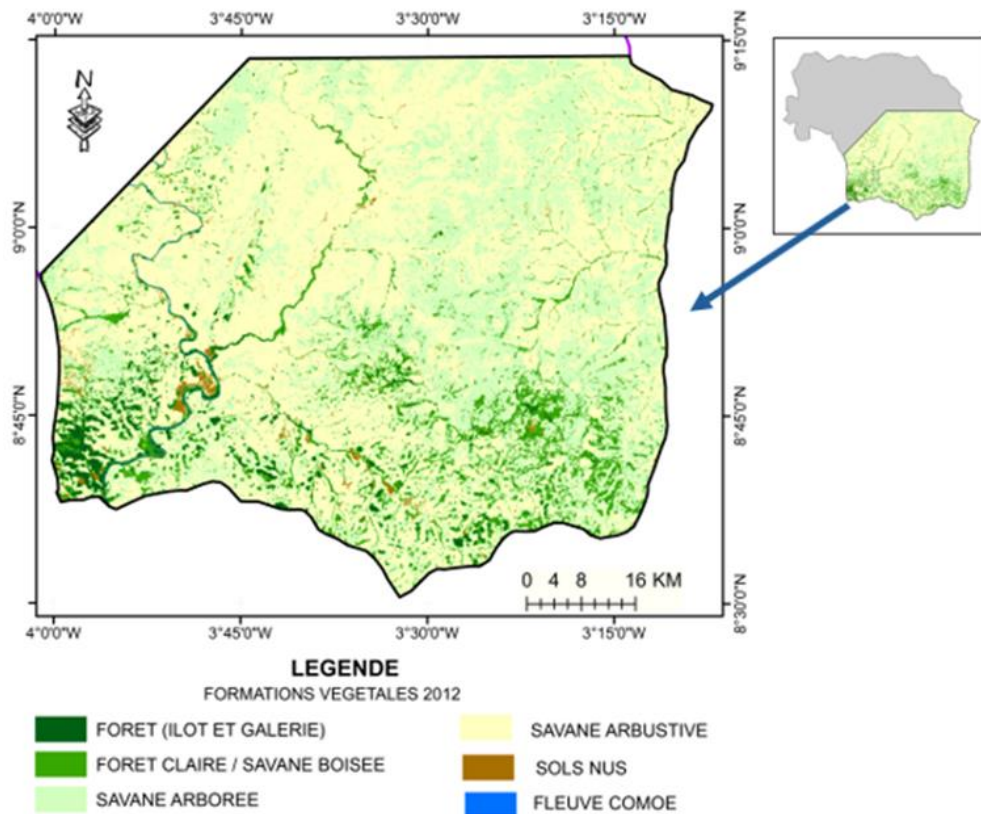


Figure 10 : Carte d'occupation du sol du Sud-Est du Parc National de la Comoé en 2012

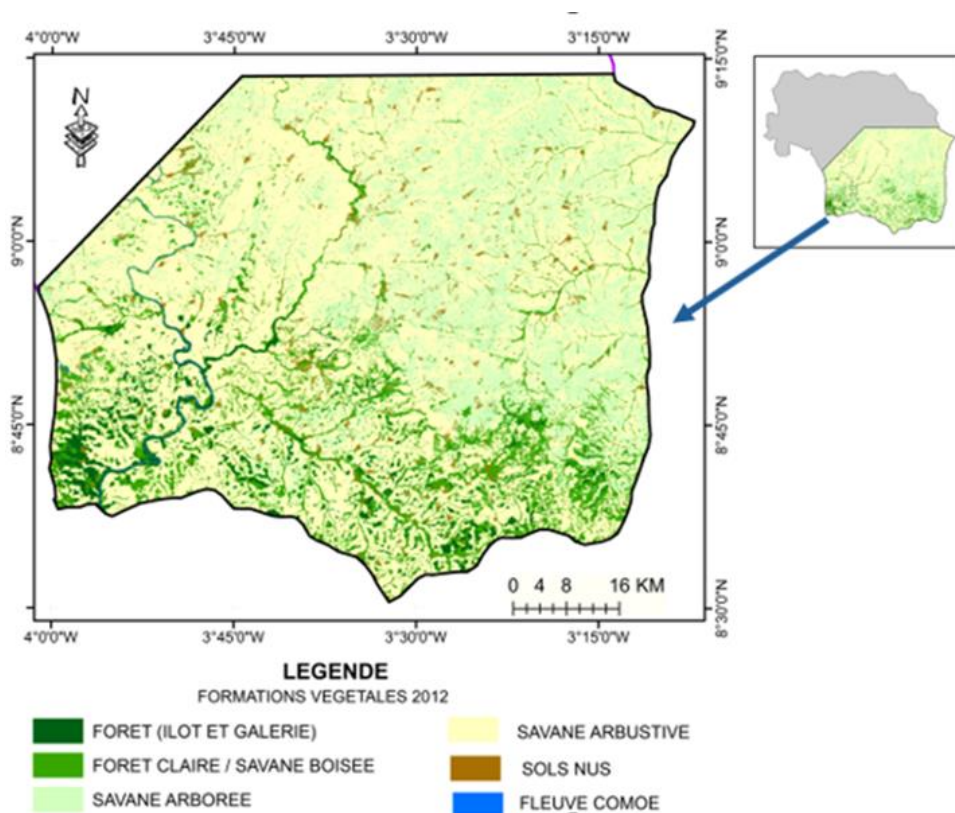


Figure 11 : Occupation du sol du Sud-Est du Parc National de la Comoé en 2022

Le Tableau 4 met en lumière deux décennies contrastées pour les formations végétales du Parc National de la Comoé. La première décennie (2002-2012) a été marquée par une forte dégradation des forêts denses, qui ont perdu 51% de leur surface, passant de 14278,20 à 7023,3 hectares, tandis que les forêts claires et savanes boisées ont diminué de 20%, passant de 41014,40 à 32632,63 hectares. Cette période témoigne d'une transition préoccupante vers des formations plus ouvertes, avec une Très légère augmentation importante des sols nus (+2,31%, atteignant 4001,23 hectares en 2012), signe d'une intensification des pressions anthropiques et climatiques. La seconde décennie (2012-2022) montre une reprise écologique avec une régénération partielle des forêts denses (+47,1%, atteignant 10328,05 hectares en 2022) et une expansion significative des forêts claires/savanes boisées (+33,5%, atteignant 43569,2 hectares en 2022). Parallèlement, la surface des sols nus reste légèrement stable à 4011,96 hectares en 2022, avec une recolonisation complète de ces sols par la végétation arbustive entre 2012 et 2022. Ces évolutions indiquent une dynamique de restauration écosystémique notable après une période de forte dégradation.

De 2002-2022, nos résultats montrent une vision globale des changements. Malgré une récente résilience, les formations forestières denses accusent toujours un bilan net négatif avec une perte de 10 270 hectares (-28%). Cette perte est partiellement compensée par une augmentation des forêts claires et savanes boisées (+2554,8 hectares). Cette évolution traduit une dynamique de savanisation modérée mais persistante, témoignant d'une transformation progressive du paysage végétal du Parc National de la Comoé.

Tableau 4 : Évolution décennale et globale des formations végétales et des types d'occupation des sols (2002-2022)

Occupation du sol	Aire 2002 (ha)	Aire 2012 (ha)	Dynamique annuelle
Forêt	14 278,20	7 023,30	PERTE
Forêt claire savane boisée	41 014,40	32 632,63	PERTE
Réseau hydrographique	864,90	812,05	PERTE
Savane arborée	122 313,00	129 216,10	GAIN
Savane arbustive	388 697,00	397 393,00	GAIN
Sol nu	3910,81	4 001,23	GAIN
Occupation du sol	Aire 2012 (ha)	Aire 2022 (ha)	Dynamique annuelle
Forêt	7 023,30	10 328,05	GAIN
Forêt claire savane boisée	32 632,63	43 569,20	GAIN
Réseau hydrographique	812,05	2 709,80	GAIN
Savane arborée	129 216,10	122 689,70	PERTE
Savane arbustive	397 393,00	387 769,60	PERTE
Sol nu	4 001,23	4 011,96	GAIN
Occupation du sol	Aire 2002 (ha)	Aire 2022 (ha)	Dynamique annuelle
Forêt	14 278,20	10 328,05	PERTE
Forêt claire savane boisée	41 014,40	43 569,20	GAIN
Réseau hydrographique	864,90	2 709,80	GAIN
Savane arborée	122 313,00	122 689,70	GAIN

Le Tableau 5 révèle des dynamiques écologiques complexes dans le Parc National de la Comoé. Les forêts montrent une vulnérabilité structurelle avec une stabilité faible de 36,31% durant la première décennie, qui s'améliore à 68,31% sur la seconde. Cependant, ces forêts se transforment principalement en forêts claires/ savanes boisées, avec des taux de mutation élevés : 63,64% entre 2002 et 2012, puis 29,77% entre 2012 et 2022. Parallèlement, le réseau hydrographique connaît une expansion remarquable, triplant presque sa superficie de 864,9 ha à 2709,8 ha durant la seconde décennie. Les forêts claires et savanes boisées évoluent vers les savanes arborées, affichant des taux de mutation respectifs de 54,27% et 21,3% sur ces périodes. Ces changements traduisent des processus naturels et anthropiques influençant la dynamique végétale du parc.

Tableau 5 : Comparaison des taux de mutation et de stabilité dans les types d'occupation des sols (2002-2012 et 2012-2022)

Occupation initiale	Occupation finale	% Mutation (2002-2012)	État	% Mutation (2012-2022)	État
Forêt	Forêt	36,31	Stabilité	68,31	Stabilité
	Forêt claire/savane boisée	63,64	Mutation	29,77	Mutation
	Réseau hydrographique	0,02	Mutation	1,71	Mutation
	Savane arborée	0,04	Mutation	0,03	Mutation
	Sol nu	-	-	0,19	Mutation
Forêt claire/savane boisée	Forêt	4,40	Mutation	13,05	Mutation
	Forêt claire/savane boisée	4,26	Stabilité	62,63	Stabilité
	Réseau hydrographique	0,03	Mutation	2,98	Mutation
	Savane arborée	54,27	Mutation	21,30	Mutation
	Savane arbustive	0,04	Mutation	0,04	Mutation
Réseau hydrographique	Forêt	3,77	Mutation	1,55	Mutation
	Forêt claire/savane boisée	12,34	Mutation	1,40	Mutation
	Réseau hydrographique	78,87	Stabilité	69,72	Stabilité
	Savane arborée	3,84	Mutation	0,63	Mutation
	Savane arbustive	1,17	Mutation	23,86	Mutation
	Sol nu	-	-	2,84	Mutation
Savane arborée	Forêt	-	-	0,01	Mutation
	Forêt claire/savane boisée	5,47	Mutation	15,35	Mutation
	Réseau hydrographique	0,02	Mutation	0,68	Mutation
	Savane arborée	50,09	Stabilité	61,36	Stabilité
	Savane arbustive	44,42	Mutation	22,54	Mutation
	Sol nu	-	-	0,04	Mutation
Savane arbustive	Forêt	-	-	0,02	Mutation
	Forêt claire/savane boisée	-	-	0,28	Mutation
	Réseau hydrographique	0,03	Mutation	0,04	Mutation
	Savane arborée	11,65	Mutation	9,28	Mutation
	Savane arbustive	87,28	Stabilité	89,59	Stabilité
	Sol nu	1,04	Mutation	0,78	Mutation
Sol nu	Savane arborée	12,67	Mutation	-	-
	Savane arbustive	87,33	Mutation	100,00	Mutation

Stabilité écologique et mutations paysagères

L'étude de la stabilité écologique repose sur l'analyse quantitative de la persistance des types d'occupation des sols entre 2002 et 2022 dans la partie sud du Parc National de la Comoé (PNC) (Tableau 6, Figure 12). Les savanes arbustives montrent la plus forte résilience avec un taux de persistance de 89,6% (test ANOVA, $F(2,1140) = 15,34$, $p = 0,001$), suivies par le réseau hydrographique (69,7%, $F(2,1140) = 8,92$, $p = 0,010$). La forêt dense présente un taux de persistance de 68,3% ($F(2,1140) = 7,85$, $p = 0,010$), tandis que les forêts claires/savanes boisées (62,6%, $F(2,1140) = 4,12$, $p = 0,050$) et les savanes arborées (61,4%, $F(2,1140) = 4,08$, $p = 0,050$) présentent une stabilité significativement plus faible.

L'analyse comparative stabilité-mutation (Tableau 6, Figure 13) confirme cette hiérarchie : les savanes arbustives ont le taux de mutation moyen le plus faible (2,1%), significativement inférieur (test du χ^2 , $\chi^2 = 2847,3$, ddl = 3, $n = 571$, $p < 0,001$) à ceux des autres formations, qui s'élèvent à 7,9% pour les forêts, 9,3% pour les forêts claires/savanes boisées, et 7,7% pour les savanes arborées.

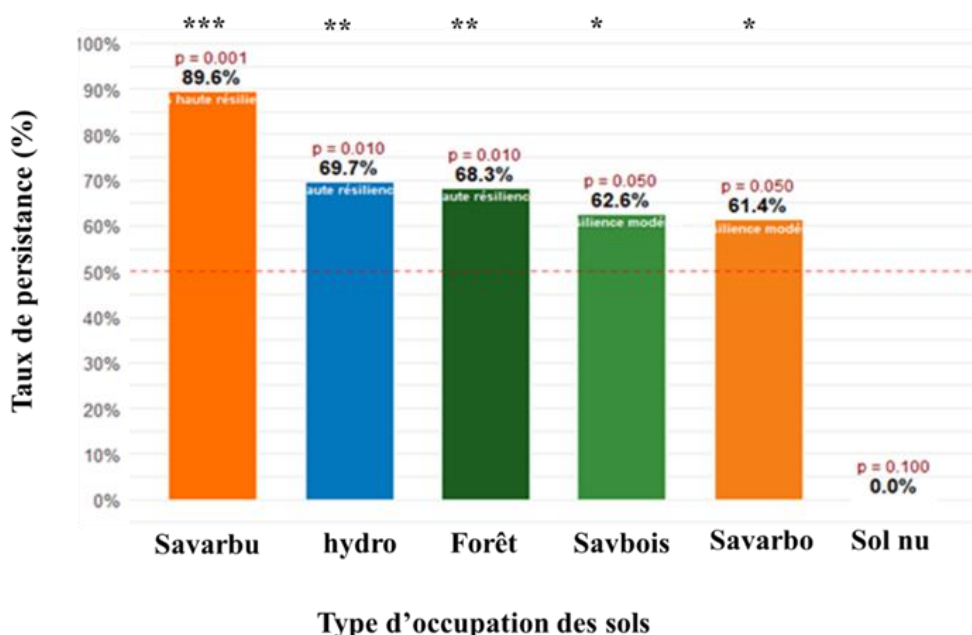
Cette étude souligne la robustesse particulière des savanes arbustives face aux changements d'occupation du sol, tandis que les formations forestières et les savanes arborées sont plus sujettes à la mutation et au renouvellement de leur couverture.

Tableau 6: Matrice de transition des types d'occupation des sols entre 2012 et 2022

2012 \ 2022	Forêt	Savane arborée	Plans d'eau	Savane à arbres	Savane arbustive	Sol nu
Forêt	68.3	29.8	1.7	0.0	—	0.2
Savane arborée	13.1	62.6	3.0	21.3	0.0	—
Plans d'eau	1.6	1.4	69.7	0.6	23.9	2.8
Savane à arbres	0.0	15.3	0.7	61.4	22.5	0.0
Savane arbustive	0.0	0.3	0.0	9.3	89.6	0.8
Sol nu	—	—	—	—	100.0	

Les valeurs diagonales (gras) indiquent le taux de persistance à $p < 0.001$, V de Cramer=0,624

Figure 12: Persistance des types d'occupation des sols (2002-2022)



Savarbu (savane arbustive), Hydro (réseau hydrographique), Savbois (savane boisée), Savarbo (savane arborée). *** (très hautement significatif), ** (hautement significatif), * (significatif)

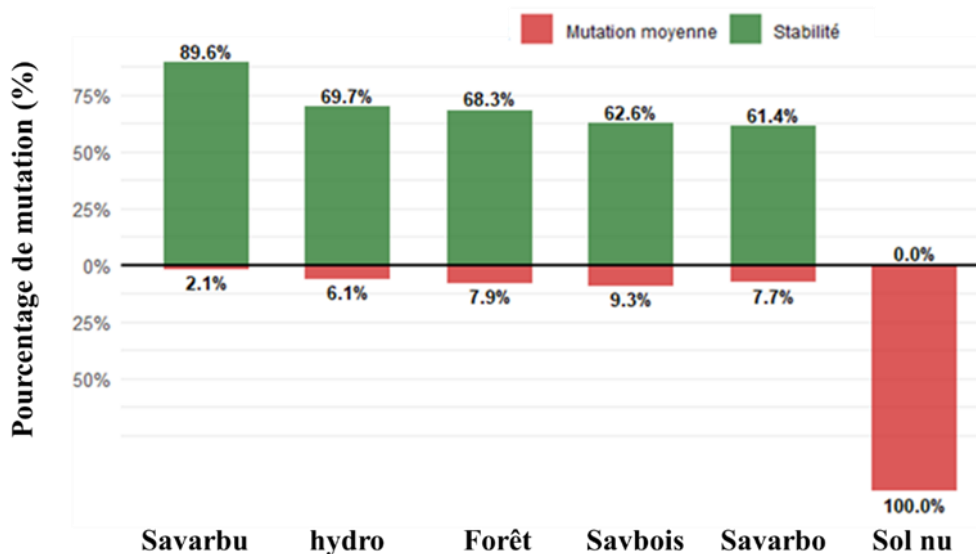


Figure 13: Comparaison stabilité vs mutation moyenne pour chaque formation végétale de 2002-2022

Discussion

Le Parc National de la Comoé, situé au nord-est de la Côte d'Ivoire, est l'une des plus vastes et diversifiées réserves naturelles d'Afrique de l'Ouest, caractérisée par une mosaïque unique d'écosystèmes de savane et de forêt dans une zone de transition écologique exceptionnelle.

Composition et dynamique spatio-temporelle des formations végétales dans le Sud du Parc National de la Comoé (2002-2022)

L'étude spatio-temporelle des formations végétales dans la partie sud du Parc National de la Comoé (PNC) révèle une prédominance constante des formations savanicoles sur la période 2002-2022. Ces formations représentent environ 89,5% de la superficie totale en 2002, atteignent un pic à 92,22% en 2012, et couvrent encore 89,38% en 2022. Cette domination s'explique par les conditions bioclimatiques spécifiques à la zone de transition soudano-guinéenne, caractérisée par un régime pluviométrique annuel de 800 à 1200 mm et une saisonnalité marquée, qui favorisent naturellement les végétations ouvertes typiques des savanes (Sankaran et al., 2005). Ces résultats vont dans le sens des descriptions de Lauginie (2007) qui qualifie le parc comme une mosaïque d'écosystèmes à dominante savanicole. Les formations forestières, quant à elles, représentent moins de 10% de la surface totale et se présentent sous forme d'îlots forestiers et de forêts galeries très fragmentés. Cette configuration spatiale correspond au modèle écologique classique des zones de transition forêt-savane observé en Afrique de l'Ouest (Fairhead & Leach, 1996) et est cohérente avec les observations faites dans d'autres aires protégées ouest-africaines (Goetze et al., 2006).

Entre 2002 et 2012, une forte diminution des surfaces forestières, de plus de 50%, est enregistrée, accompagnée d'une baisse de 20,44% des savanes arbustives. Cette dégradation reflète principalement l'impact de la crise socio-politique ivoirienne qui a affaibli le contrôle des institutions et favorisé les activités illégales telles que le braconnage et le défrichement (Koueita et al., 2018). Depuis 2012, un renversement de cette tendance est observé, avec une augmentation de 47% des formations forestières et une légère baisse (-3,1%) des savanes, traduisant une stabilisation progressive du contexte politique et un renforcement de la gestion des aires protégées (Rainfroy, 2017).

Ces évolutions peuvent également être expliquées par des variations climatiques décennales. Une phase plus sèche entre 2002 et 2012 aurait favorisé la progression des savanes aux dépens des forêts, tandis qu'une humidité accrue après 2012 a permis la régénération forestière (Nicholson et al., 2018). Les écosystèmes forêt-savane dans la zone étudiée sont particulièrement sensibles même à de modestes fluctuations pluviométriques (Scheiter & Higgins, 2009).

Résilience écologique, fragmentation et gestion

Les forêts claires-savanes boisées ont connu les mutations les plus marquées : une diminution de 54,27% entre 2002 et 2012, suivie d'une hausse de 62,63% de 2012 à 2022. Ces formations, qui constituent des écotones entre les forêts denses et les savanes, présentent une sensibilité particulière aux changements environnementaux et représentent d'excellents indicateurs des dynamiques écologiques régionales (Hennenberg et al., 2006). Leur fluctuation importante traduit un effet tampon, absorbant en premier lieu les pressions environnementales et profitant rapidement des conditions favorables à la régénération, conformément aux modèles d'équilibres alternatifs forêt-savane décrits par Staver et al. (2011).

Même si les plans d'eau et les sols nus représentent une faible part du territoire (respectivement 0,15% et 0,68% en 2002), ils jouent un rôle crucial dans la résilience hydrologique et écologique du parc, élément vital pour la biodiversité dans cette zone où l'eau constitue souvent une ressource limitée (Brncic et al., 2007).

L'inversion de la tendance après 2012 illustre une capacité de résilience écologique notable des écosystèmes du parc, soutenue par la régénération des forêts existantes. Cependant, la fragmentation importante et persistante des formations forestières (îlots et forêts galeries) limite cette résilience, compromettant l'intégrité écologique et la connectivité des habitats. Cela souligne la nécessité d'interventions ciblées pour restaurer les corridors écologiques, essentielles à la pérennité des espèces forestières (Bodin et al., 2006). Harper et al. (2005) insistent aussi sur l'importance de considérer les effets de lisière, comme les modifications microclimatiques et l'invasion d'espèces savaniques, qui affectent la qualité écologique des forêts fragmentées.

Par ailleurs, la prédominance des formations savaniques appelle à une gestion adaptative des régimes de feux, un levier clé pour orienter la succession végétale selon les objectifs de conservation. Des expériences en Afrique de l'Ouest démontrent que l'ajustement de la fréquence, l'intensité et la saisonnalité des feux peut favoriser soit l'expansion forestière, soit le maintien des savanes (Laris & Wardell, 2006), ce qui est particulièrement pertinent pour la gestion des forêts claires-savanes boisées sensibles aux perturbations.

Enfin, la classification des types de végétation dans des zones de transition écologiques telles que le PNC comporte des défis méthodologiques importants. Les seuils choisis pour différencier des catégories proches, comme forêts claires vs savanes arborées, influencent les estimations de surface et les interprétations des dynamiques. Une analyse de sensibilité aux paramètres de classification renforcerait la fiabilité des conclusions (Sasaki & Putz, 2009).

Conclusion

Le Parc National de la Comoé présente une dynamique végétale dominée par les savanes, couvrant plus de 89% de la zone entre 2002 et 2022, sous l'influence du climat de transition soudano-guinéenne. Les formations forestières, minoritaires et fragmentées, ont diminué fortement jusqu'en 2012 avant de connaître une reprise liée à l'amélioration de la gestion et à des variations climatiques. La fragmentation forestière persiste, limitant la résilience écologique. Au-delà de ce constat, les observations révèlent la résilience des savanes arbustives qui ont conservé en grande partie leur superficie, contrastant avec la vulnérabilité structurelle des formations forestières. Malgré leur capacité de régénération à la suite de l'atténuation des pressions anthropiques dues au retour d'une gestion effective, les forêts denses affichent un bilan net négatif sur les deux décennies. Dans ce contexte, une évolution des stratégies de conservation s'impose. La gestion future du parc doit intégrer en plus du contrôle des pressions immédiates, une approche proactive de restauration écologique. La priorité doit être accordée à la reconstitution de la connectivité paysagère par la restauration active des corridors écologiques entre les massifs forestiers fragmentés. Parallèlement, une gestion adaptative et différenciée du régime des feux est cruciale pour favoriser la progression des formations forestières dans les écotones et contenir le processus de savanisation.

Remerciements

Nous exprimons notre profonde gratitude à l'Office Ivoirien des Parcs et Réserves (OIPR) et à sa Direction de la Zone Nord (DZN) pour leur soutien logistique et technique, ainsi qu'au personnel administratif et technique de la direction de Bouna pour l'appui technique précieux apporté tout au long de la réalisation de ces travaux.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Archibald, S., Roy, D. P., Van Wilgen, B. W., Scholes, R. J., 2009. What limits fire? An examination of drivers of burnt area in Southern Africa. *Global Change Biology*, 15(3), 613–630. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01754.x>.

2. Barima Y. S. S., 2009. Dynamique, fragmentation et diversité végétale des paysages en milieux de transition forêt-savane dans le département de Tanda (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université libre de Bruxelles (Bruxelles, Belgique), 196 p.
3. Bodin, O., Tengö, M., Norman, A., Lundberg, J., Elmqvist, T., 2006. The value of small size: Loss of forest patches and ecological thresholds in southern Madagascar. *Ecological Applications*, 16(2), 440–451. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[0440:TVOSSL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[0440:TVOSSL]2.0.CO;2).
4. Brncic, T. M., Willis, K. J., Harris, D. J., & Washington, R., 2007. Culture or climate? The relative influences of past processes on the composition of the lowland Congo rainforest. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 362(1478), 229-242. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1982>.
5. Chander G., et Markham B. L., 2003. Revised Landsat 5 TM Radiometric Calibration Procedures and Post-Calibration Dynamic Ranges. *IEEE transaction on geoscience and remote sensing*, 41(11) : 2674-2677.
6. Fairhead, J., Leach, M., 1996. *Misreading the African landscape*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139164023>.
7. Goetze, D., Hörsch, B., & Porembski, S., 2006. Dynamics of forest–savanna mosaics in north-eastern Ivory Coast from 1954 to 2002. *Journal of Biogeography*, 33(4), 653–664. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01312.x>.
8. Harper, K. A., Macdonald, S. E., Burton, P. J., Chen, J., Broszofski, K. D., Saunders, S. C., Esseen, P. A., 2005. Edge influence on forest structure and composition in fragmented landscapes. *Conservation Biology*, 19(3), 768-782. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00045.x>.
9. Hennenberg, K.J.; Fischer, F.; Kouadio, K.; Goetze, D.; Orthmann, B.; Linsenmair, K.E.; Jeltsch, F.; Porembski, S., 2006. Phytomass and fire occurrence along forest-savanna transects in the Comoé National Park, Ivory Coast; *Journal of Tropical Ecology* 22: pp. 303-311.
10. Koueita, M., Konaté, K., Diomandé, M., Brou, A. N., 2018. La problématique de gestion du Parc National de la Comoé (PNC) en Côte d'Ivoire, entre la survie des populations riveraines et la conservation de la biodiversité. *European Scientific Journal*, 14(35), 391–411. <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n35p391>.
11. Laris, P., Wardell, D. A., 2006. Good, bad or 'necessary evil'? Reinterpreting the colonial burning experiments in the savanna

- landscapes of West Africa. *The Geographical Journal*, 172(4), 271–290. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2006.00215.x>.
12. Lauginie, F. R., 2007. *Conservation de la nature et aires protégées en Côte d'Ivoire* (Vol. 1, XX-668 p.). CEDA/NEI/Hachette et Afrique Nature. Nicholson, S. E., Funk, C., & Fink, A. H. (2018). Rainfall over the African continent from the 19th through the 21st century. *Global and Planetary Change*, 165, 114–127. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.12.014>.
 13. Oszwald J., Antoine L., Arnould de Sartre X., Marcello T., Gond V., 2010. Analyse des directions de changement des états de surface végétaux pour renseigner la dynamique du front pionnier de Maçaranduba (Brésil) entre 1997 et 2006. *Télédétection*, 9(2) : 97-111.
 14. Rainfroy, C., 2017. Côte d'Ivoire : le parc national de la Comoé n'est plus en péril, selon l'UNESCO. *Jeune Afrique*. Repéré à <https://www.jeuneafrique.com/454042/societe/cote-divoire-parc-national-de-comoe-retire-de-liste-patrimoine-peril/>.
 15. Sankaran, M., Hanan, N. P., Scholes, R. J., Ratnam, J., Augustine, D. J., Cade, B. S., Gignoux, J., Higgins, S. I., Le Roux, X., Ludwig, F., Ardo, J., Banyikwa, F., Bronn, A., Bucini, G., Caylor, K. K., Coughenour, M. B., Diouf, A., Ekaya, W., Feral, C. J., February, E. C., Frost, P. G., Hiernaux, P., Hrabar, H., Metzger, K. L., Prins, H. H., Ringrose, S., Sea, W., Tews, J., Worden, J., & Zambatis, N., 2005. Determinants of woody cover in African savannas. *Nature*, 438(7069), 846–849. <https://doi.org/10.1038/nature04070>.
 16. Sasaki, N., Putz, F. E., 2009. Critical need for new definitions of “forest” and “forest degradation” in global climate change agreements. *Conservation Letters*, 2(4), 226–232. <https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2009.00067.x>.
 17. Scheiter, S., Higgins, S. I., 2009. Impacts of climate change on the vegetation of Africa: An adaptive dynamic vegetation modelling approach. *Global Change Biology*, 15(9), 2224–2246. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01838.x>.
 18. Staver, A. C., Archibald, S., Levin, S. A., 2011. The global extent and determinants of savanna and forest as alternative biome states. *Science*, 334(6053), 230-232. <https://doi.org/10.1126/science.1210465>.