



Modélisation prospective des changements d'occupation du sol d'une zone humide à l'aide du modèle Perceptron Multicouche et chaîne de Markov : Cas de la zone Ramsar de N'Ganda N'Ganda (Côte d'Ivoire)

Prospective modelling of land use changes in a wetland, using Multi-Layer Perceptron Model and Markov chain: the case of N'Ganda N'Ganda Ramsar area (Ivory Coast)

AKADJE-KONAN Léocadie Marie-Claude

Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

<https://orcid.org/0000-0003-2765-3557>

Résumé: Les zones humides sont des milieux très productifs, avec des services écosystémiques très importants pour la survie des populations. En vue de les préserver certaines zones ont été déclarées zones Ramsar comme la zone Ramsar de N'Ganda N'Ganda. C'est une zone humide avec une forêt classée en son sein. Située à proximité de la grande ville Abidjan, elle est une zone en pleine urbanisation. Sur ce milieu s'exerce donc une forte pression anthropique comme dans toutes les zones humides. Afin de contribuer à une meilleure connaissance de cette zone humide, cette étude a été initiée afin d'analyser la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol de la zone humide de N'Ganda N'Ganda et ses environs afin de simuler son évolution à l'horizon 2040, simulation qui serait un outil très utile pour anticiper sur le futur possible de la zone et aider à mettre en œuvre une stratégie adaptée pour sa gestion efficace. Une méthodologie combinant la télédétection, les SIG et la modélisation spatiale à l'aide du modèle couplant le Perceptron Multicouche et les chaînes de Markov (MLP-Markov) a été implémentée, à partir d'images satellites LANDSAT de 1986, 2015 et 2024 afin de cartographier l'occupation du sol, puis de mettre en évidence les transformations qui ont eu cours, pour terminer de simuler l'occupation du sol en 2040 de la zone humide de N'Ganda N'Ganda.

Ainsi, entre 1986 et 2024, le paysage est caractérisé par d'une part, par la régression des superficies des forêts, fourrés marécageux et des mangroves et d'autre part par un accroissement des superficies savaniques des espaces de culture et jachère et des zones bâties et sol nu. Ces mutations traduisent l'expression des pressions anthropiques sur le milieu naturel.

La projection de l'occupation du sol en 2040 met en évidence une continuité des tendances ; source de fragmentation des habitats naturels et de dégradation des fonctions écologiques. Ces résultats sont un outil d'aide à la décision qui permettrait d'orienter les actions des gestionnaires.

Mots clés: Modélisation prédictive ; Télédétection ; SIG ; MLP-Markov ; Ramsar ; N'Ganda N'Ganda

Abstract

Wetlands are very productive ecosystems that deliver vital ecosystem service for populations. To preserve them, some areas have been listed as Ramsar site, like the N'Ganda N'Ganda Ramsar site, Near Abidjan which is a the major city, it is an area undergoing urbanization. Like all wetland, this area is subject to significant human pressure. To contribute to better understanding of this N'Ganda N'Ganda wetland, this study was initiated to analyse the dynamics of land use in this area and its surrounding in order to simulate its evolution by 2040. This simulation would be a valuable tool to anticipate the future of area's and help to implement an appropriate strategy for a best management.

The methodology combines remote sensing, geographic information system and spatial modelling, using the multilayer perceptron and Markov chains. The methodology use Landsat satellite images from 1986, 2015 and 2024 to map land cover, highlight the changes that taken place and finally, simulate the land cover of the N'Ganda N'Ganda wetland in 2040.

Thus, between 1986 and 2024, the landscape is characterized in one part, by a decline in the area's forests, swampy thickets and mangroves, and in other part, by an increase savannah area, cultivate and fallow lands and built-up and ground areas. These changes reflect anthropogenic pressures on the natural environment.

The land-use projection for 2040 highlights a continuation of these trends, which are a cause of fragmentation and the degradation of ecological functions. These results can be used as a tool to help decision-making And guide the actions of land managers.

Keywords : Predictive modeling, Remote sensing, GIS ; MLP-Markov, wetland, N'Ganda N'Ganda

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.22068827>

1 Introduction

« Les zones humides sont des étendues de marais de Fagnes, de tourbières ou d'eau naturelle ou artificielle, permanentes, temporaires ou l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salées, y compris Des étendues d'eau marines, dont la profondeur à marée basse, n'excède pas six mètres » (G. A. Mastaki, 2023, p.4). Elles figurent parmi les écosystèmes les plus productifs du monde entier. Elles sont un réservoir de grande biodiversité et jouent un rôle essentiel Elles assurent de nombreuses fonctions notamment la conservation de la biodiversité, la régulation des régimes hydrologiques. Ce sont aussi des puits de carbone, car elles ont une grande capacité de séquestration de carbone. Elles offrent d'énormes services aux populations riveraines en étant un soutien pour leurs activités socio-économiques (Ramsar, 2018, P9).

Ces zones humides sont malencontreusement en régression dans le monde entier. Elles sont sujettes à de nombreuses pressions anthropiques. En effet, plusieurs activités humaines, notamment l'agriculture et l'exploitation des ressources naturelles, l'urbanisation entraînent la dégradation voire la destruction de ces milieux. À l'échelle mondiale, les zones humides naturelles intérieures et côtières représentaient plus de 12, 1 millions d'hectares en 1970. Elles ont régressé de plus de 35% en 2015 (Ramsar, 2018, p.7).

C'est donc en vue de leur gestion durable et ou de leur préservation que la convention de Ramsar a été créée et ratifiée par plusieurs pays, en 1971. Elle sert de cadre international pour la préservation de la protection de zones humides et la promotion de leur gestion rationnelle. Malgré ce cadre institutionnel, les sites Ramsar, à l'échelle mondiale subissent les mêmes pressions que les zones humides en générales. Ces pressions sont surtout liées aux activités agricoles (Ramsar, 2014, p. 13).

En Côte d'Ivoire, les zones humides ont aussi régressé. Malgré leur utilité et les nombreuses fonctions écologiques qu'elles assurent, les services offerts aux populations. Consciente de leur importance, la Côte d'Ivoire a aussi ratifié, en 2005, le traité de la Convention Ramsar avec 5 sites inscrits pour leur valeur écologique exceptionnelle, parmi lesquels le site Ramsar de N'Ganda N'Ganda

Comme toutes les zones humides de Côte d'Ivoire, le site Ramsar de N'Ganda N'Ganda est soumis à des pressions croissantes liées aux activités humaines. L'expansion agricole, l'urbanisation progressive, avec l'ouverture de nouvelles voies de communications contribuent à transformer le milieu naturel et à faire régresser des zones humides. Ces transformations sont sources de modification de l'occupation du sol ; ce qui a pour conséquence une dégradation du fonctionnement écologique et hydrologique de la zone humide.

Face aux enjeux liés à la préservation des zones humides, la connaissance des dynamiques de ces milieux apparaît comme une étape primordiale pour l'orientation des politiques de gestion et de conservation. L'analyse des dynamiques passées et la simulation prospective de l'occupation du sol seraient utiles pour anticiper les risques de dégradation (Sylla et al., 2018, p.), mais aussi d'évaluer l'efficacité potentielle des mesures de protection envisagées.

Très peu d'études ont porté sur la zone Ramsar de N'ganda N'ganda. Il s'agit d'une étude réalisée par Kouadio et al. (2014, p. 184) qui a fait l'inventaire avifaunique qui a mis en exergue une diversité de 132 espèces d'oiseaux. Une autre étude ayant porté sur la diversité floristique de la forêt classée de N'Ganda N'Ganda à quant à elle dénombrée 445 espèces de plante a été dirigée par (Tchimou, 2020, ...p). L'évolution de l'occupation du sol de la zone Ramsar de N'Ganda N'ganda a mis en exergue à partir d'une analyse diachronique les changements qui se sont opérés dans la zone Ramsar les dynamiques passées. Il s'agit d'une régression des zones forestières au profit des zones agricoles (Sylla et al., 2022, p20).

Toutefois, ces travaux demeurent prospectifs ; ils ne permettent pas d'anticiper les trajectoires de transformation du milieu pour une meilleure gestion du site.

Ainsi, les connaissances liées à la dynamique réelle de l'occupation du sol et au futur de la zone humide restent insuffisantes pour une gestion efficiente, d'où l'intérêt de cette étude prospective. En effet, en combinant les Systèmes d'information Géographiques (SIG), la télédétection et les modèles de simulation spatiaux, il est possible de reproduire les dynamiques observées et de simuler l'occupation du sol futur, ce qui est un outil important pour anticiper les trajectoires des paysages et d'aider à la prise de décision pour leur gestion efficiente. Cette étude s'inscrit donc dans cette vision. Elle a pour but de simuler le futur possible de la zone Ramsar de N'Ganda N'ganda en s'appuyant sur un modèle couplant les réseaux de neurones et les chaînes de Markov. Il s'agit spécifiquement de cartographier les changements observés 1986 et 2024, puis de déterminer les principales transitions et leur facteurs explicatifs et pour terminer de simuler l'occupation du sol en 2040 afin de produire un outil pour aider à la gestion durable de cette zone humide.

Aussi, pour réaliser cette étude, il est important de mettre en œuvre une méthodologie spécifique.

2 Données et méthodes

2.1 Le site Ramsar de N'Ganda N'Ganda

Le site de N'Ganda N'Ganda se situe au sud-est de la Côte d'Ivoire, dans la région administrative du sud Comoe. Il couvre les sous-préfectures de Grand-Bassam et d'Adiaké. Mais l'étendue de la zone d'étude pour cette étude dépassera les limites de la zone Ramsar de N'Ganda N'Ganda afin d'avoir une vision plus globale (figure 1).

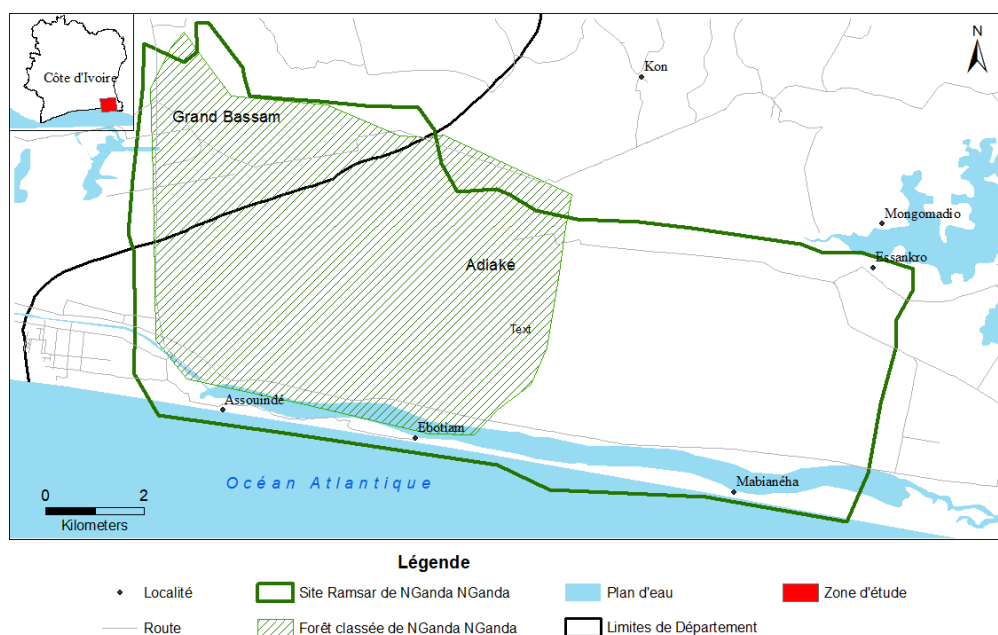


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

Cette zone est caractérisée par un relief plat ; elle fait partie des plaines côtières du golfe de Guinée. Les altitudes y sont très faibles et oscillent entre 0 et 50m maximum. Les sols y sont peu évolués, brunifiés, ferrallitiques et surtout des sols hydromorphes. Cependant les sols sableux côtiers sont les plus dominant dans la région.

Le climat de la région est de type tropical humide avec 2deux saisons de pluie et deux saisons sèches. Les précipitations moyennes sont de 2100mm de pluie par an et des températures de 27° en moyenne. Elle se situe dans le secteur mésophile et se caractérise par des complexes d'écosystèmes margino-littoraux d'Afrique de l'ouest. » (Eldin,1971). Elle est composée de forêts des savanes côtières, des forêts sur terre ferme et fourrés marécageux et de mangrove avec une large bande littorale où se situe le canal d'Assinie. En effet un canal a été creusé depuis 1942 qui relie les lagunes Ebrié et Aby. « Etant donc compris entre le fleuve Comoé, la mer et les lagune Aby et Ebrié et le canal d'Assinie, N'Ganda N'Ganda constitue un réceptacle des eaux douces d'origine continentales, des précipitations et des eaux saumâtres d'origine lagunaires et des eaux salées d'origine marine (Sankaré et al., 2005, 2p) » Cette zone joue un rôle très important dans l'équilibre hydrique.

Compte tenu de ses caractéristique physique, elle abrite une faune très importante. De ce fait la zone présente de nombreux atouts touristiques et attire de nombreux visiteurs et sa population avoisine 200 000 habitants. Ces derniers sont des pêcheurs ou des agriculteurs pour la majorité. Alors ce milieu leur est bénéfique surtout pour leurs activités, lesquelles impactent souvent négativement ce milieu.

Dans l'optique d'étudier ces conséquences sur la zone humide, plusieurs données et des méthodes spécifiques ont été utilisées.

2.2 Données de l'étude

Les données utilisées pour la cartographie de l'occupation du sol de la forêt classée de N'GANDA N'GANDA sont de deux types.

2.2.1 Les images satellitaires

Les images satellitaires utilisées, au nombre de quatre sont des images LANDSAT de la scène [195-056] de résolution spatiale, 30 mètres/pixel. Elles portent sur les années 1986 (capteur Thematic Mapper), 2000 (capteur Enhanced Thematic Mapper), 2015 (capteur OLI) et 2024 (capteur OLI2). Elles ont servi à cartographier l'occupation du sol aux différentes dates.

2.2.2 Des échantillons de l'occupation du sol

Ils ont servi de parcelles d'entraînement à l'algorithme de classification pour une partie et de parcelles de validation des résultats de la classification, pour l'autre partie. Ils sont de deux types que sont des échantillons de 2024 obtenus à partir de l'interprétation d'images satellitaires de très haute résolution sur la plateforme Collecte Earth Online de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture et des données in-situ collectées à l'aide du GPS lors d'une mission de terrain en 2018.

2.3 Méthodes mobilisées

Ces données ont subi plusieurs prétraitements et traitement afin d'aboutir à des résultats exploitables.

2.3.1 Prétraitement des données

Plusieurs opérations de prétraitement ont été réalisés sur les images Landsat.

En effet, les images Landsat de 1986 et 2000 ont d'abord subi une correction radiométrique afin d'assurer la comparabilité des images. Les valeurs numériques des images ont été converties en réflectance au sommet de l'atmosphère. Cela a permis de normaliser les données et supprimer les effets liés aux paramètres du capteur et à l'illumination solaire.

Une correction atmosphérique a aussi été effectuée afin d'éliminer les effets de diffusion atmosphérique. La méthode Dark Object Subtraction a été utilisée à cet effet.

La zone d'étude a ensuite été extraite des différentes images avec l'emprise géographique couvrant la forêt classée de N'Ganda N'Ganda entre les coordonnées 3,503477° à l'ouest, -3,320779° à l'est, 5,231131° au nord et 5,133118° au sud.

Plusieurs indices ont ensuite été calculés afin d'améliorer la détection des objets sur les images et permettre une meilleure discrimination thématique. Pour cette étude les indices qui ont été retenus sont :

L'indice de végétation normalisé (NDVI) met en évidence la végétation ; il est calculé selon la formule $NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$ avec «PIR» est le canal du proche infrarouge et «R», le canal du rouge ;

L'analyse en composante principale a permis de décorrélérer les bandes brutes afin d'éviter la redondance d'information.

La transformation Tasseled Cap a été appliquée sur les bandes brutes afin de condenser l'information spectrale en trois composantes dont l'indice d'humidité pour caractériser les zones humides, les mangrove et l'indice de brillance qui met en exergue les sols nu ou dégradée et l'urbanisation.

Plusieurs néocanaux ont ensuite été créés à partir de ces indices, pour enrichir les données brutes initiales afin d'avoir une meilleure discrimination des objets au sol.

2.3.2 Traitement des données

Une approche dirigée à partir de l'algorithme du maximum de vraisemblance a été utilisée pour classifier les images. D'abord, une nomenclature des types d'occupation du sol a été définie sur la base des données d'observation in-situ. Six classes thématiques ont été retenues. Ce sont les classes eau, cultures/jachère, bâti/sol nu, forêt sur terre ferme, savane herbeuse. Puis, la classification est exécutée pour chaque date avec 150 parcelles d'entraînement. Ensuite les échantillons d'apprentissage, selon une bonne représentativité statistique ont été numérisés manuellement sur la composition colorée. Enfin la classification supervisée a été effectuée sur l'image traité, suivi d'un filtre post classificatoire pour éliminer l'effet poivre et sel.

2.3.3 Evaluation de la classification

Elle a été nécessaire pour évaluer la performance de la classification. Cette évaluation a été réalisée à partir de matrices de confusion, elle-même produite à partir des parcelles de validation. Pour se faire, plusieurs indicateurs ont été calculés. Ce sont la précision globale, le coefficient de kappa, la précision du producteur et celle de l'utilisateur.

Cette évaluation tient compte de la précision globale des classifications et de l'indice de kappa

- Précision générale des classifications

Les classifications des images satellites de 1986, 2015 et 2024 sur la zone Ramsar de N'GANDA N'Ganda présentent des précisions globales respectives de 84,10%, 88,42% et 86,19% avec la classification de 2015 ayant la meilleure précision, soit 88,42%. Ces précisions globales sont au-delà des 84% et donc relativement stables sur la période étudiée. Cela signifie donc que pour chacune des classifications, plus de 84% des pixels ont été affectés à la bonne classe.

Aussi, le kappa pour ces quatre années varie entre 0,79 et 0,83. Cela exprime un accord substantiel entre les classifications et les données de références (Landis et KOCH, 1977). Ce qui indique que les classifications des différentes images sont fiables et leurs résultats utilisables.

Néanmoins, quelques confusions sont perceptibles à l'analyse des matrices.

- Précision par classe sur la période étudiée

-La classe « Bâti/ Sol nu »

Pour toutes les années, la précision du producteur est très élevée ; elle est au-dessus des 85%, bien qu'il existe des confusions infimes avec la savane herbeuse en 2015 et 2024 à hauteur de 17%.

-La classe « fourrés marécageux /mangrove »

La précision du producteur de la classe fourrés marécageux /mangrove s'améliore sur la période. De 62,72% de pixels bien classées en 1986, elle passe à 70,94% en 2015 pour atteindre 88,72% en 2024.

En effet, ces différents taux sont dus à une importante confusion observée avec les cultures et jachères en 1986 (32,84%) et avec la forêt sur terre ferme en 2015 (28,01%) et les cultures et jachères (23,79% en 1986).

Ces confusions traduisent une similarité structurale et spectrale entre ces formations, ce qui rend difficile leur séparabilité.

-La classe « forêt sur terre ferme »

Pour cette classe, la précision du producteur est de 99% en 1986 et de 83,77% en 2024 ; mais elle atteint à peine 7,14% en 2015. Pour cette dernière année l'erreur d'omission dépasse donc les 90%. Elle se traduit par des confusions permanentes avec les classes de fourrés marécageux /mangrove , et de cultures et jachères. Cela présage d'une proximité spectrale entre la forêt sur terre ferme et les autres formations forestière et les cultures et jachères.

-La classe « eau »

C'est la classe qui présente une séparabilité parfaite d'avec les autres classes. La précision du producteur est pour toutes les années supérieure à 99%. Elle pourrait s'expliquer par la signature spectrale de l'eau qui est distincte des autres types d'occupation du sol.

-La classe « savane herbeuse »

La précision du producteur pour cette classe est supérieure à 89%, signe d'une bonne discrimination des pixels de savane herbeuse. Néanmoins, la précision de l'utilisateur est plus faible ; elle exprime donc une surestimation de cette classe au détriment d'autres classes que sont les sols nus et bâtis, les forêts et les cultures et jachères.

-La classe « culture et jachère »

Cette classe présente une précision de producteur élevée et assez stable pour toutes les années ; elle varie de 86% et 100%. Mais, une confusion notable est faite avec les fourrés marécageux /mangrove . Elle atteint les 19, 29% et 16,78, respectivement en 1986 et en 2024.

En définitive, à part la classe forêt sur terre ferme qui reste problématique, la méthodologie utilisée a permis de discriminer chaque type d'occupation du sol afin d'obtenir une cartographie valide avec une bonne précision globale pour toutes les dates.

Aussi, certaines erreurs ou difficultés importantes sont à souligner. Ce sont :

- La confusion entre les formations forestière du fait de leur proximité structurale et spectrales ;
- La confusion entre la savane et les bâtis et sol nu qui peut être due à une similitude entre la réflectance des sols nus et celle des espaces herbacés
- Et pour finir la confusion entre les forêts et les cultures et jachères ;
- La classe forêt sur terre ferme reste, dans ce paysage, la classe la plus difficile à discriminer.

Les cartes d'occupation du sol aux différentes dates ont été ensuite vectorisées et intégrées dans un SIG

2.3.4 Intégration dans un SIG et évaluation des superficies

Afin d'évaluation les superficies paysagères, les différentes classifications vectorisées ont été intégrées dans un SIG afin de faciliter les analyses spatiales. Les superficies des différents types d'occupation du sol ont été calculées. Cette étape a permis de voir l'évolution des différents types d'occupation du sol et les écarts entre les différentes périodes.

2.3.5 Analyse de la dynamique de l'occupation du sol

Les couches d'information sur l'occupation du sol de 1986 et 2015 ont été différentes années ont été croisées entre elles, par le biais d'une opération d'intersection à l'aide de l'outil « union ». Cette opération a pour objectif de déterminer les zones de stabilité et les zones de mutation. Mais elle a aussi aidé à la détection des différents changements qui ont eu cours dans le milieu.

- Identification des différents facteurs explicatifs des changements

Elle a pour but de déterminer les variables susceptibles d'influencer les transformations de la zone humide. Ce sont les variables de transition. Elles sont de type naturel ou anthropique.

- Choix des variables explicatives

Le choix des variables explicatives se base sur les principaux facteurs d'influencer les mutations d'occupation du sol, dans le site Ramsar. Il s'appuie à la fois sur l'analyse de la dynamique spatiale de la zone entre la période 1986 à 2024, les observations de terrain et les travaux antérieurs consacrés à la modélisation de l'occupation du sol. Plusieurs variables retenues sont celles dont l'influence sur les processus de mutation est reconnue dans la littérature.

Ce sont :

-les distances aux routes : Les routes sont des axes privilégiés de développement des activités anthropiques. Elles facilitent l'accès aux parcelles agricoles, aux zones de construction ou aux ressources humaines. Les transformations s'opèrent en général à proximité des axes routiers.

-La distance aux localités : Les transformations tendent à s'effectuer autour de noyaux déjà établis. Ces sont des pôles de concentration de population et des activités économiques. De ce fait, ce sont des zones d'attractivité pour l'expansion urbaine

- l'altitude : Bien que les altitudes soient faibles relativement faibles, elles ont une influence sur le drainage et l'inondation des terres. Ce sont des indicateurs pour l'aptitude des terres pour l'urbanisation , l'agriculture ou pour le maintien des formations humides.

-Pentes : les pentes faibles sont favorables aux activités anthropiques tandis que les zones plus accidentées sont moins soumises aux mutations.

- La distance aux plans d'eau : Les plans d'eau exercent une influence double sur l'organisation spatiale du territoire. Ils favorisent le développement de certaines activités anthropiques (tourisme, pêche, agriculture) mais ils sont aussi des barrières à la pénétration des zones humides et à l'expansion humaine.

-Occupation du sol initial : Chaque classe d'occupation du sol présentent une probabilité de conversion., en fonction de sa nature et des dynamiques observées sur la période étudiée.

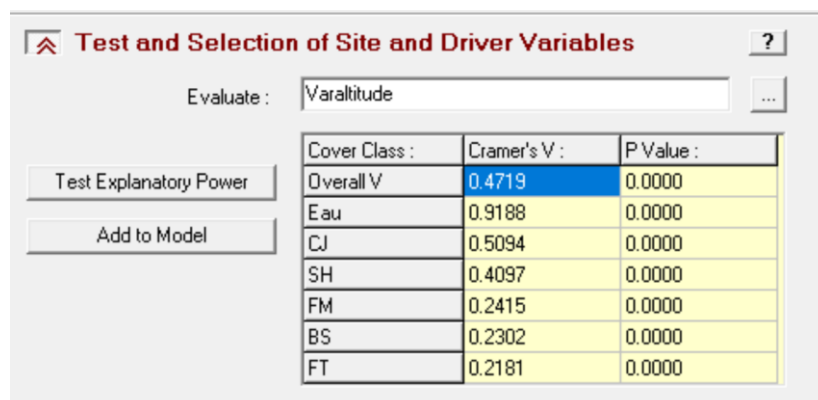
Ces variables sont utilisées pour représenter les facteurs susceptibles de contrôler les transformations spatiales dans la zone Ramsar.

- Préparation des variables

Les variables sont toutes mises au format raster avec la même échelle, la même emprise la même résolution spatiale que les cartes d'occupation du sol afin de permettre leur superposition. Puis les distances ont été calculées à l'aide de la fonction « Distance » de Idrisi. Mais la pente quant à elle, a été dérivée du modèle numérique de terrain.

- Evaluation de la pertinence des variables

Avant leur intégration au modèle, la pertinence de chaque variable explicative est évaluée. En effet, toutes les variables explicatives ont été évaluée à l'aide de l'indice de Cramer's V qui varie entre 0 et 1. Il mesure le degré de corrélation entre chaque variable et les transitions observées. Un coefficient de Cramer's V supérieur ou égal à 0,40 indique une relation forte entre la variable et les conversions observées (figure 2) ; en dessous de 0,15, la corrélation est très faible entre la variable et les conversions observées. Entre 0,15 et 0,40 le coefficient de Cramer's V est modéré.



Cover Class :	Cramer's V :	P Value :
Overall V	0.4719	0.0000
Eau	0.9188	0.0000
CJ	0.5094	0.0000
SH	0.4097	0.0000
FM	0.2415	0.0000
BS	0.2302	0.0000
FT	0.2181	0.0000

Figure 2. tableau des coefficients de Cramer's

Pour la modélisation, seuls les facteurs présentant une relation modérée à forte avec les transitions ont été retenus. Ce sont : le Modèle numérique de terrain, la distance aux localités, la distance aux routes, les pentes, la distance aux cours et aux plans d'eau.

A partir du Réseau de Neurones Multicouche (MLP) du module Transition Potentials, ces variables ont servi à la production de cartes de probabilité de transitions, utiles pour la simulation prospective de l'occupation du sol.

2.3.6 Prédiction des changements d'occupation du sol

Cette étape consiste à simuler l'occupation du sol future en se basant sur les tendances antérieures et des de transitions potentielles produites.

- Estimation des quantités de changement

La quantité de changement pour chaque classe est estimée à partir des chaînes de Markov. Une matrice de transition est calculée entre deux dates de référence et a permis de déterminer la probabilité de changement d'une classe en une autre ou son maintien au cours de la période étudiée. Elle permet d'estimer les superficies futures des types d'occupation du sol.

- Allocation spatiale des changements

La localisation spatiale des changements a été effectuée en combinant les changements estimés par les chaînes de Markov, les cartes potentiel de transition issues du MLP et un filtre d'automates cellulaire, qui a pour but de reproduire la contiguïté spatiale des phénomènes d'urbanisation. Ainsi, les changements seront attribués aux pixels présentant les probabilités de transition les plus élevées tout en tenant compte de l'influence du voisinage.

- Paramétrage de la simulation

La simulation est effectuée sur la base des cartes d'occupation de référence que sont les cartes de 1986 et 2015. Elles ont été retenues pour calibrer le modèle de simulation, par une simulation de l'occupation du sol en 2024 afin de la comparer à la carte réelle de 2024.

La carte réelle de 2024 qui est la plus récente a servi d'état initial et les probabilités de transition qui ont été calculées ont permis de projeter l'évolution à l'horizon 2040. La carte d'occupation du sol initiale, les matrices de transition de Markov, les cartes de potentiel de transition et les contraintes spatiales liées aux zones protégées ainsi que la date pour la simulation sont les paramètres définis dans le module Change Prediction.

- La construction du scénario

La simulation prospective est basée sur un scénario tendanciel qui suppose la poursuite des dynamiques actuelles, sans intervention significative de gestion ou de protection. Il considère que les facteurs qui ont entraînés les changements observés entre 1986 et 2024 continueront d'agir de façon identique jusqu'en 2040, sans qu'il n'y ait d'intervention ou de nouvelles politiques d'aménagement.

- Prise en compte des incertitudes

La projection à l'horizon 2040 est soumise à plusieurs sources d'incertitude. La première source est relative à la qualité des cartes d'occupation du sol utilisées comme données d'entrée du modèle. Les classifications réalisées pour les différentes dates présentent des confusions entre certaines classes, notamment entre les formations végétales et les espaces agricoles. Ces précisions globales sont respectivement de 84,10%, 88,24% et 86,19% respectivement en 1986, 2015 et 2024 avec des kappa compris entre 0,79 et 0,83.

Les performances propres du modèle de simulation sont la deuxième source d'incertitude. La validation du modèle de calibration en simulant l'occupation du sol en 2024 présente une précision globale de 75,57% et un indice de compétence de 0,715 ; Ainsi, les écarts observés entre les superficies observées et simulées présentent une inégale incertitude selon les classes d'occupation du sol.

Pour terminer, une troisième source d'incertitude est identifiée. Elle est liée aux hypothèses du scénario tendanciel qui repose sur l'hypothèse d'une poursuite des tendances observées au cours de la période 1986-224, sans modification majeure des facteurs actuels d'évolution du territoire.

La prédiction de l'occupation de 2040 ne constitue donc pas une prédiction certaine de l'état futur de la zone humide, mais plutôt une estimation conditionnelle de sa trajectoire possible si les tendances actuelles se maintiennent. Cette projection doit être interprétée comme un scénario d'alerte permettant d'identifier les secteurs et les classes d'occupation du sol susceptible d'être soumis à une pression accrue.

- Validation de la simulation

La performance du modèle MLP-Markov a été évaluée par une procédure de validation rétrospective. En effet, Le modèle a été calibré à l'aide des cartes d'occupation du sol de 1986 et 2015 pour simuler l'occupation du sol en 2024. La carte simulée en 2024 a ensuite été comparée à la carte d'occupation du sol observée en 2024, considérée comme carte de référence. Cette procédure permet d'évaluer la capacité de modèle à reproduire une dynamique connue avant son utilisation pour une projection future.

La concordance entre la carte réelle de 2024 et la carte simulée de 2024 a été évaluée à partir de deux indicateurs que sont le coefficient de kappa et la précision globale. La précision globale mesure la part de pixels correctement simulés par le modèle, en pourcentage alors que le kappa ou indice de compétence permet d'apprécier la qualité de la simulation en tenant compte de la concordance obtenue. Il est compris entre les valeurs 0 et 1. Toutes les valeurs obtenues pour cette validation ont servi comme référence pour apprécier la fiabilité de la projection de 2040.

Ces résultats permettent d'évaluer l'ampleur de la régression de la zone de N'Ganda N'Ganda face à la pression foncière sans cesse croissante.

3 Résultats et discussion

Cette étude a permis des analyses rétrospective et prospective de l'occupation du sol de la zone Ramsar de N'Ganda N'Ganda.

3.1 Analyse diachronique de l'occupation du sol de la zone Ramsar de N'Ganda N'Ganda

Le traitement des images satellitaires a permis l'identification de six principales classes d'occupation du sol dans la zone humide de N'ganda N'Ganda : les forêts sur terre ferme, les forêts marécageuses, les savanes herbeuses, les cultures et jachères, les plans d'eau et le bâti / Sols nus. Leur distribution spatiale en 1986 est représentée sur la figure 3.

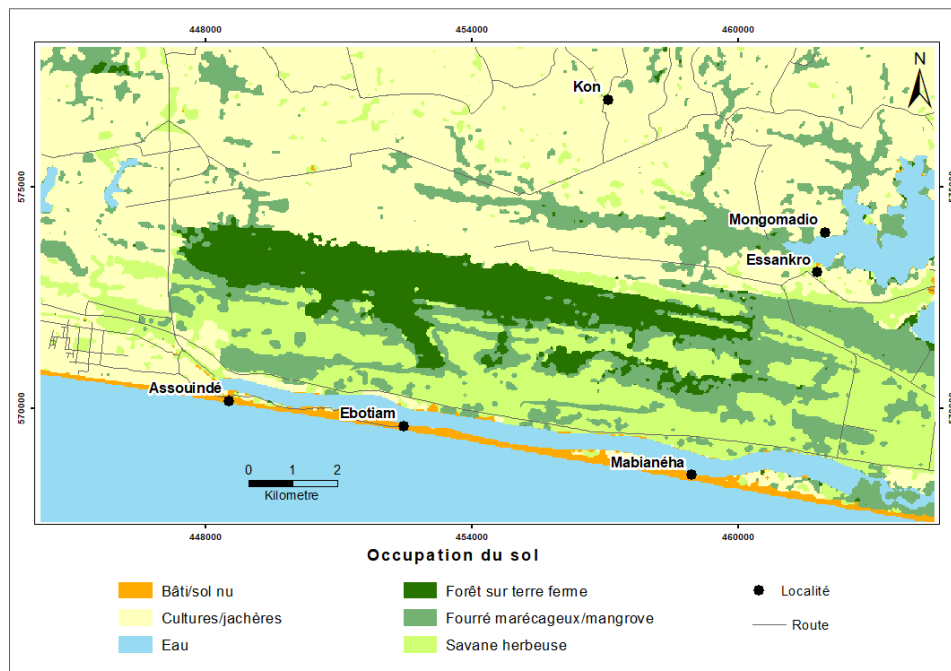


Figure 3. Carte de l'occupation du sol de N'Ganda N'Ganda en 1986

En 1986, la majeure partie du bâti se situait au sud de la N’Ganda N’Ganda, le long du littoral, avec quelques surfaces cultivées.

Dès 2015, le bâti a gagné du terrain sur le continent, au-delà du canal (figure 4). Les zones de cultures et jachères quant à elles se concentrent dans le nord de la zone et représentent les plus grandes superficies.

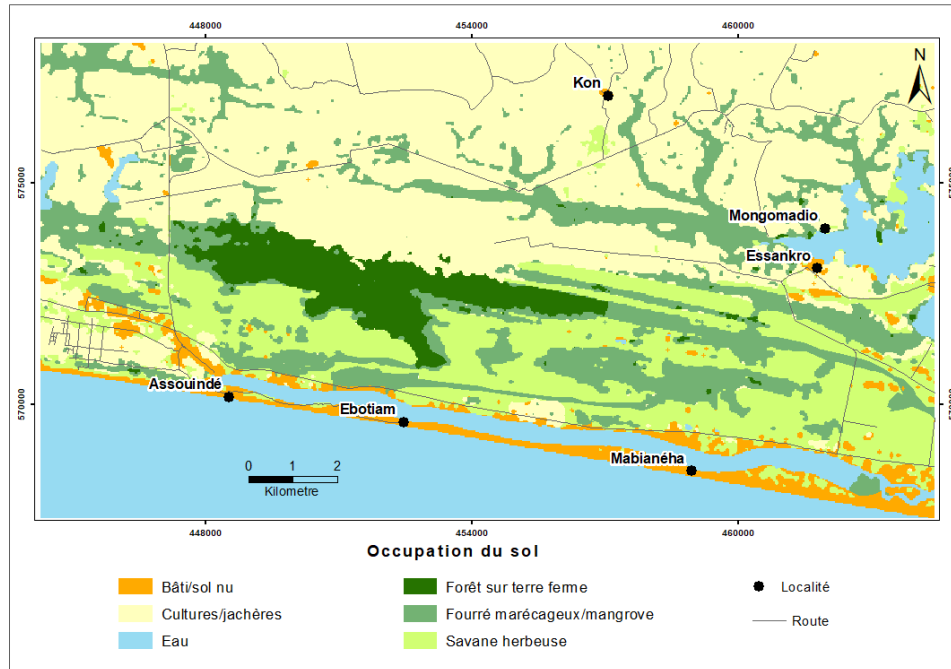


Figure 4. Carte de l’occupation du sol de N’Ganda N’Ganda en 1986

Les fourrés marécageux /mangrove et forêt sur terre ferme se localisent dans toute la partie centrale de l’espace étudié.

L’analyse diachronique de l’occupation du sol entre 1986 et 2015 met en évidence d’importantes évolutions observées dans le paysage de N’Ganda N’Ganda. Le tableau I présente l’évolution des différentes superficies des types d’occupation du sol.

Table 1. Statistiques de l’évolution des superficies des types d’occupation du sol à N’Ganda N’Ganda

OCS \ Années	1986		2015		2024	
	en ha	en %	en ha	en %	en ha	en %
Forêt sur terre ferme	1571,64	7,29	960,07	4,45	1484,55	6,89
Fourrés marécageux /mangrove	3131,91	14,53	3418,74	15,86	3559,5	16,51
Cultures /jachères	8816,19	40,89	8412,81	39,02	8954,1	41,53
Eau	4481,12	20,79	4473,19	20,75	4466,97	20,72
Bâti /sols nus	332,62	1,54	905,51	4,20	956,16	4,44
Savane herbeuse	3225,75	14,96	3388,91	15,72	2137,95	9,92
Total général	21559,2	100,00	21559,23	100,00	21559,23	100,00

Les résultats présentent une régression progressive des forêts sur terre ferme et des cultures et jachères. Les forêts sur terre ferme qui occupaient 1571,64 ha en 1986, ne couvrent plus que 960 ha en 2015 ; soit une perte de 38,9% des forêt sur terre ferme. Les zones de cultures et jachères, elles, ont régressé de 403,38 ha pour ne représenter que 8412,81ha en 2015, avant de connaître une légère hausse en 2024 où elles s’étendent sur 8954,1 ha. Néanmoins, les formations marécageuses et les bâti / sols nus n’ont cessé de croître de 1986 à 2024 sur toute la période étudiée.

Ils sont passés respectivement de 3131,91 ha et 332,62 ha en 1986 à 3559,49 et 956,16ha. Les superficies de bâti/sols nus ont triplé.

3.2 Analyse des transitions observées entre unité d'occupation du sol

La matrice de transition issue de l'analyse des dynamiques entre 1986 et 2015 (Table 2) met en exergue les mutations intervenues dans la zone humide de N'Ganda N'Ganda. Elle présente dans sa diagonale les valeurs des types d'occupation du sol jugés stables, tandis que les valeurs hors de celle-ci traduit la conversion d'une unité d'occupation du sol vers une autre.

Table 2. Statistiques des transitions spatiales entre 1986 et 2015

Situation en 1986 (superficie en ha)	Transitions en 2015 (superficie en ha)					
	FT	FM	CJ	EAU	BS	SH
Forêt sur terre ferme (FT)	833,99	430,9	185,35	0	0	121,4
Fourrés marécageux /mangrove	104,34	1827,01	530,81	0	104,46	565,29
Culture/jachère	0	828,97	7402,29	0	173,62	411,31
Eau	0	0	0	4450,92	30,2	0
Bâti/sol nu	0	0	0	22,27	310,35	0
Savane herbeuse	21,74	331,86	294,36	0	286,88	2290,91
TOTAL	960,07	3418,74	8412,81	4473,19	905,51	3388,91

Toutes les classes d'occupation du sol présentent plus de 50% de stabilité. Ceci traduit le maintien de plus de la moitié de chaque type d'occupation du sol dans sa catégorie. De façon spécifique, les classes d'occupation naturelle que sont les forêts sur terre ferme et les formations marécageuses présentent tout de même les taux de stabilité les plus bas (respectivement 53,06 et 58, 54%). Par contre, les classes cultures et jachères présentent 83,96% et la classe bâtis et sol nus 93,3% de stabilité.

Ce sont d'abord les cultures / jachères avec 7402,29 ha qui sont maintenues dans la même classe ; ce qui caractérise la durabilité des activités agricoles. Ces dernières statistiques expriment un ancrage durable des activités anthropiques.

Néanmoins, les résultats présentent aussi de nombreuses transformations dans la zone. En effet, près de la moitié des formation forestières et marécageuses ont subi des mutations ; ce sont les milieux les plus affectés par les changements de l'occupation du sol.

Les forêts sur terre ferme ont été converties en formation marécageuse (430,90 ha), en savane herbeuse (121,4 ha) et en culture et jachères (121,4 ha). Ces mutations traduisent non seulement un processus de transformation écologique, mais aussi des pressions anthropiques sur les forêts marécageuses.

De même, les mutations exercées sur les forêts marécageuses sont une reconversion en savane herbeuse (565,29 ha), en cultures et jachères (530,81 ha) et en bâtis et sol nus (104,46). Elles témoignent de la transformation progressive de ces forêts.

A l'opposé de ces régressions, les résultats mettent en évidence une expansion des espaces humanisés. En effet, les cultures et jachères ainsi que les bâtis et sols nus apparaissent comme les principales unités d'occupation du sol bénéficiaires des différents changements. Les superficies de cultures et jachères bénéficient des mutations des forêts marécageuses (530,81) et de terre ferme (185,35 ha) ainsi que des savanes herbeuses (294,36 ha). Cette extension met exprime une amplification des activités anthropiques. De ce fait, l'agriculture apparait comme un facteur très important dans le processus de transformation du paysage.

Le bâtis et les sols nus quant à eux sont accrus avec des superficies issues des savanes herbeuses (286,88ha), des cultures et jachères (173,62 ha) et des forêts et fourrés (104,89ha).

Les savanes herbeuses bien qu'elles connaissent une importante stabilité (2290,91ha, soit 71,02%) gagnent des superficies issues de forêts marécageuses (565,29ha) , de forêt sur terre ferme (121,4 ha) et de cultures et jachères(411,31ha). Toutes ces reconversions peuvent être mettre en relief des phénomènes de dégradation des forêt ou d'abandon des terre agricoles.

Toutes ces changements témoignent d'une forte pression humaine sur les écosystèmes naturels. Ils sont susceptibles d'affecter à long terme la biodiversité et les différentes fonctions de la zone humide.

En effet, l'analyse des dynamiques de l'occupation du sol dans la zone humide de N'Ganda N'Ganda révèle une transformation progressive et marquée du paysage sous l'impulsion des activités anthropiques. Alors sur la base de ces changements observés, une modélisation prospective à l'horizon 2040 a été réalisée, afin d'évaluer les conséquences de ces tendances sur l'évolution future de la zone Ramsar.

Toutefois avant d'effectuer toute projection, il est important d'évaluer les capacités du modèle à reproduire les changements spatiaux observés.

3.3 Validation du modèle de simulation

La carte de l'occupation du sol simulée en 2024 est comparée à la carte réelle de la même année. Elle permet d'évaluer la capacité du modèle à reproduire les changements observés dans le milieu. Les cartes réelles et simulées de 2024 sont présentées par la figure 5.

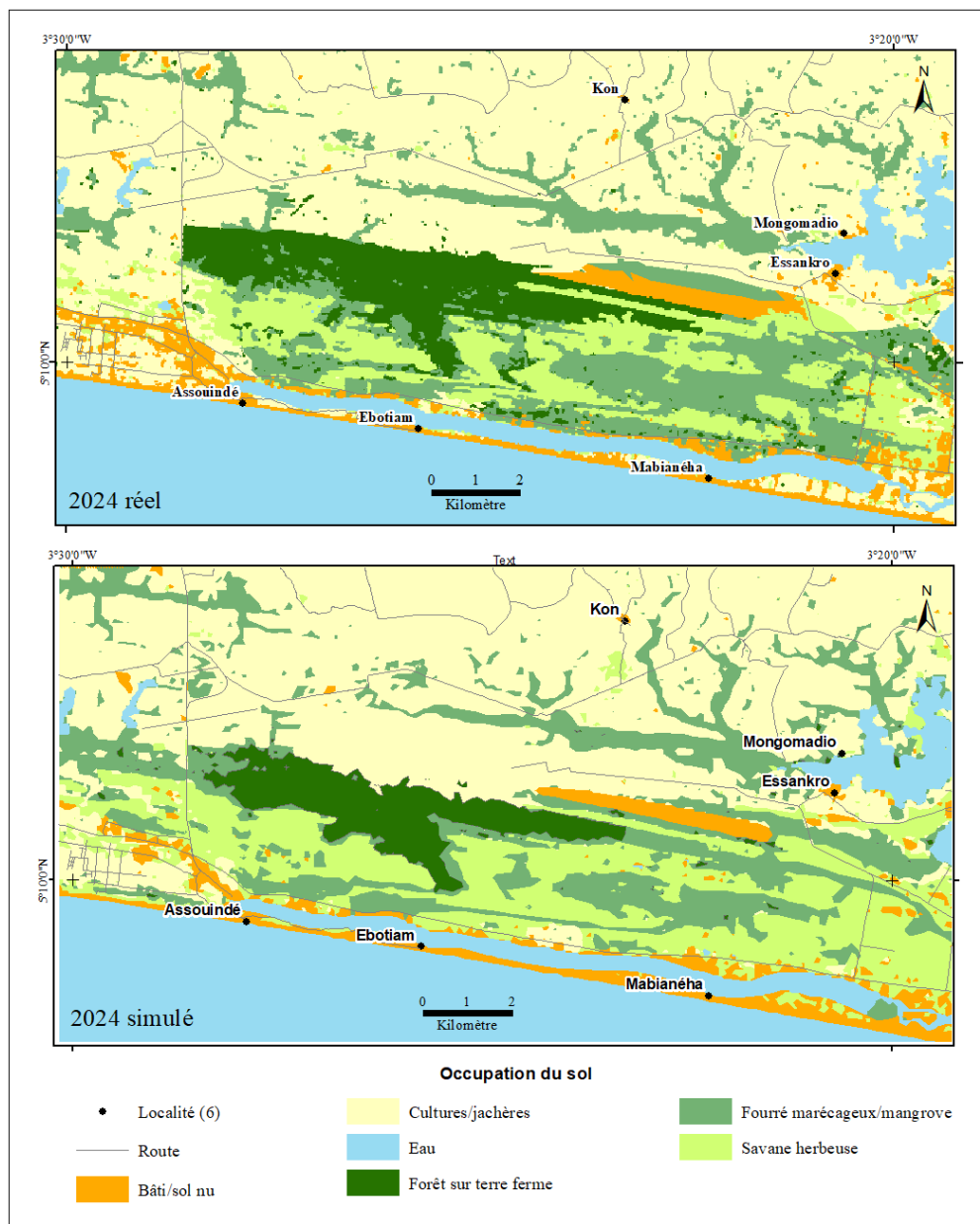


Figure 5 : carte de l'occupation du sol simulée et réelle en 2024

Visuellement les cartes présentent une similitude globale. Néanmoins les statistiques contenues dans la table 3 présentant les superficies simulées et observées pour les différentes unités d'occupation du sol, permettent une meilleure appréciation.

Table 3. Validation rétrospective du modèle MLP-Markov : Comparaison des superficies observées et simulées en 2024

Classe	OCS Réel en 2024 (ha)	OCS Simulée en 2024 (ha)	Écart (ha)
Forêt sur terre ferme	1484,55	958,44	-526,11
Fourrés marécageux /mangrove	3 342,22	3 240,71	-101,51
Cultures/jachères	8954,1	8395,48	-558,62
Eau	4466,97	4496,06	29,09
Bâti/sols nus	1 173,44	1 071,84	-101,6
Savane herbeuse	2137,95	3396,7	1258,75
TOTAL	21559,23	21559,23	

Les résultats statistiques présentent aussi une cohérence générale satisfaisante entre les deux cartes. De façon générale, le modèle a surestimé certaines superficies et en a sous-estimé d'autres.

L'écart est très faible (29,09 Ha) pour la classe eau où les superficies simulées sont relativement proches des superficies observées, ce qui signifie que le modèle a bien simulé les superficies de la classe eau.

Un écart d'environ 100 ha entre la carte réelle et celle simulée de 2024 existe pour les classes et Bâti et sols nus et les fourrés marécageux /mangrove. Les superficies simulées se rapprochent des superficies observées. Il existe aussi une bonne similarité aussi bien entre les fourrés marécageux réels et ceux simulés qui représentent respectivement des superficies de 3 342,22 ha et 3 240,71 ha, et les Bâti et sols réel (1 173,44 ha) et simulé (1 071,84 ha)

Malgré ces écarts, la validation rétrospective du modèle présente une précision globale de 75,57% et un indice de compétence de 0,7150. Ces valeurs traduisent la capacité globale satisfaisante du modèle à reproduire les dynamiques spatiales observées en 2024 dans le site Ramsar.

Toutefois, cette performance du modèle varie selon les unités d'occupation du sol. Les variations les plus marquées concernent les classes forêt sur terre ferme, cultures et jachères ainsi que les savanes herbeuses. En effet, les superficies de forêt sur terre ferme et culture et jachères ont été sous-estimées, avec un écart de plus de 500 ha. A l'inverse, les superficies simulées de savane herbeuse ont été largement surestimées, avec plus de 1 258,75 ha.

Tous ces écarts montrent que la capacité de reproduction du modèle varie selon la nature et la complexité des transitions entre les différentes classes d'occupation du sol. Ils constituent une première indication de l'incertitude associée aux projections futures.

Néanmoins, ce modèle a été mobilisé pour projeter l'évolution future de l'occupation du sol de la zone, afin d'entrevoir les tendances spatiales susceptibles de se produire et caractériser le paysage.

3.3 Modélisation prospective de l'occupation du sol à l'horizon 2040

Les résultats de la simulation tendanciel mettent en évidence une continuité des mutations observées au cours des précédentes années (Figure 6).

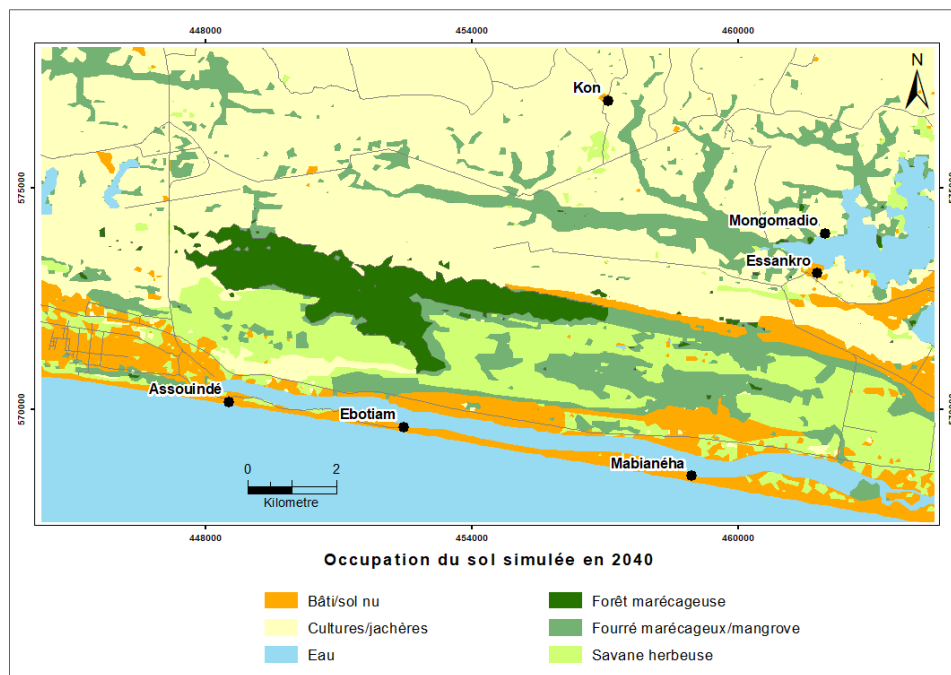


Figure 6 : Carte simulée de l'occupation du sol simulée en 2040

Il est caractérisé par le maintien de la pression anthropique sur le milieu. Selon le scénario tendanciel, en 2040, les forêts sur terre ferme pourraient atteindre sur 966,75 ha, soit 4,8% de la superficie totale de la zone Ramsar (table 4).

Table 4 : Statistique des superficies simulées de l'occupation du sol en 2040

OCS \ Année	2040	
	en ha	en %
Forêt sur terre ferme	966,75	4,48
Fourrés marécageux /mangrove	2638,94	12,24
Cultures /jachères	9175,23	42,56
Eau	4493,94	20,84
Bâti /sols nus	1905,15	8,84
Savane herbeuse	2379,98	11,04
Total général	21559,17	100,00

La faible proportion des forêts sur terre confirme leur fragilité face aux pressions et aux changements d'occupation du sol. Toujours selon la projection tendancielle en 2040, les fourrés marécageux et les mangroves, quant à eux, pourraient occuper 2 638,94 ha qui constitueraient 12,24% de la zone étudiée. Ce serait donc la troisième unité spatiale la plus représentée. La mise en relation des données observées de 2024 avec celles des données simulées en 2040 montre qu'il pourrait donc être observé dans le futur une régression des superficies des formations sur terre ferme et des fourrés marécageux / mangrove avec des pertes respectives de 517,8 ha et de 704,1 ha.

Selon les résultats du scénario tendanciel, en 2040, les cultures et jachères demeureront la classe dominante avec une superficie simulée de 9175,23 ha, soit 42,56% de la superficie totale. Il en serait de même pour les bâtis et sols nus dont les superficies augmenteraient d'environ 731,71 ha pour atteindre 1905,15 ha. Cela traduit bien le maintien de la pression anthropique due aux activités agricoles et d'urbanisation sur le milieu.

En outre, les savanes herbeuses occuperaient des superficies 2379,98 ha. Cette unité d'occupation du sol connaîtrait une hausse légère de plus de 220 ha qui caractériserait le maintien de la continuité de l'anthropisation de la zone Ramsar. Cette augmentation pourrait exprimer une tendance à l'ouverture du paysage, qui pourrait être

le résultat de la dégradation des forêts et des fourrés marécageuses et mangrove, mais aussi la reconversion de certaines terres agricoles. Aussi, les zones les plus vulnérables sont les zones celles qui sont partiellement urbanisées, ainsi que les berges lagunaires accessibles par la route,

En définitive, les résultats de la simulation de l'occupation du sol mettent en exergue la continuité des tendances actuelles en 2040. Tandis que les forêts et les fourrés marécageux et mangroves sont soumis à une pression croissante, les espaces bâtis et sols nus ainsi que les savanes heureuses connaissent une hausse. Toutes ces tendances traduisent une transformation lente, mais progressive de la zone Ramsar de N'Ganda N'Ganda. Elle met en relief la nécessité de mettre en œuvre des stratégies de gestion durable afin de préserver les fonctions écologiques et les écosystèmes naturels.

3.3. Discussion

L'étude rétrospective de la zone met en évidence de profondes transformations de l'occupation du sol. Les principales mutations sont d'une part, la régression des forêts et des fourrés marécageux et d'autre part la prédominance des espaces agricoles. Toutes ces évolutions traduisent une anthropisation progressive des paysages, comme dans toutes zones humides de l'Afrique de l'ouest.

La régression des forêts sur terre ferme et des fourrés s'explique par l'expansion des activités agricoles, l'exploitation des ressources forestières et la croissance des besoins fonciers des populations. En effet, ces observations sont cohérentes avec ceux de nombreux auteurs dont YOHOUIN. (2019, p44) et BOHOUHOU et al. (2024, p 257) ayant étudiés les zones humides ivoiriennes et ouest africains. Ils mettent en exergue la pression anthropique sur les milieux naturelles et plus particulièrement, ils lient la dégradation des ressources forestières à la croissance des besoins des populations et indexent l'agriculture et la croissance des agglomération comme les principaux facteurs de dégradation des zones humides.

En effet, les zones agricoles demeurent les espaces dominants. Cela confirme que les activités agricoles structurent désormais l'espace et traduit une intensification de l'occupation humaine susceptible de réduire progressivement les capacités de la zone humide à assurer ses fonctions écologiques.

La génération du modèle de simulation présente un taux de précision global de 75,57% et un indice de compétence de 0,7150 ; ils indiquent une capacité globalement satisfaisante du modèle à reproduire les dynamiques spatiales observées. Toutefois, elles doivent être interprétées avec prudence en raison des écarts observés pour certaines classes d'occupation, notamment la savane herbeuse, la forêt sur terre ferme et les cultures/ jachères. Tous ces écarts constituent une source d'incertitude qui doit être prise en compte dans l'interprétation des projections à l'horizon 2040. Ainsi, les résultats de cette étude prospective pour devrait être considérée comme des trajectoires tendancielle possibles plutôt que comme une prédiction déterministe de l'état futur de la zone humide.

Ces écarts pourraient s'expliquer par la marge d'erreur dans les classifications des images satellitaires, la complexité des processus de transition et les hypothèses sur lesquelles reposent la modélisation. OSSENI (2026, p.18) soutient cette thèse. car ces travaux. Le modèle utilisé dans ses travaux n'a pas fait une prédiction parfaite de l'occupation du sol, mais a bien traduit l'accélération des évolutions sur la période d'étude. Il a donc attribué ces écarts à la variable réseau routier stable qui était stable pour la calibration du modèle, mais a évolué avec le temps. De telles limites sont rapportées par plusieurs autres travaux qui ont utilisé les modèles des chaînes de Markov liés aux automates cellulaires. En effet, NDIKWE et al. (2026, p 20) dans leurs travaux ont combiné les deux algorithmes afin de combler le manque de l'autre et améliorer leurs résultats. Néanmoins, il a été constaté à partir des valeurs de probabilité de transition une instabilité des unités d'occupation du sol en général, due à la pression anthropique croissante sur le milieu. Ils suggèrent donc une pondération des facteurs de mutation avant la modélisation afin de tenir compte de l'impact de chaque facteur sur le milieu. La modélisation prédictive réalisée pour 2040 est une continuité des tendances actuelles avec les superficies de cultures et jachère qui couvrent une majorité des superficies et l'augmentation des zones de savanes. Son analyse traduit transformation graduelle du paysage ; ce qui aurait pour effet de fragmenter les habitats naturels et de dégrader les services écosystémiques de la zone Ramsar. Toutes ces transformations risqueraient de compromettre les fonctions écologiques de la zone Ramsar.

En effet, il est important de souligner que ce scénario tendanciel est le scénario le plus probable si aucune action d'aménagement ou de préservation n'est entreprise. Ces résultats démontrent donc tout l'intérêt de la modélisation prospective comme un outil d'aide à la décision. En effet, les cartes simulées permettent d'identifier les secteurs

vulnérables aux changements futurs et peuvent contribuer à élaborer des stratégies de gestion adaptées pour la conservation de la zone humides et le maintien de tous les services écosystémiques, mais aussi pour la restauration et la gestion durable des ressources naturelles.

Néanmoins, le modèle repose principalement sur des variables biophysiques et d'accessibilité. L'absence de certaines variables socio-économiques notamment la densité de population, les indicateurs économiques et les données foncières constituent une source supplémentaire d'incertitude dans la projection. En effet, ces facteurs peuvent influencer l'intensité et la localisation des changements futurs d'occupation du sol. Leur intégration dans les futures simulations permettrait d'améliorer non seulement la représentation des mécanismes socio-spatiaux à l'origine des mutations, et potentiellement aussi les performances du modèle.

4 Conclusion

Cette étude a permis d'analyser la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol de la zone humide de N'Ganda N'Ganda et ses environs afin de simuler son évolution à l'orée 2040.

La méthodologie de cette étude a combiné la télédétection, les SIG et la modélisation spatiale. Elle a permis de mettre en exergue les mutations principales qui ont eu cours dans la zone étudiée.

Ainsi, entre 1986 et 2024, le paysage présente une reconfiguration caractérisée d'une part, par la régression des forêts et fourrés marécageux /mangrove et d'autre part par une augmentation des superficies savaniques et une prédominance des espaces de culture et jachère. Cette reconfiguration est le résultat d'une pression anthropique sans cesse croissante, sur le milieu naturel.

La projection tendancielle à l'horizon 2040 de l'occupation du sol à N'Ganda N'Ganda suggère une poursuite des tendances observées au cours de la période 1986-2024, notamment la régression des formations forestières et des fourrés marécageux/ mangrove ainsi que la progression des espaces anthropisés. Mais compte tenu des performances de validation du modèle et des différentes sources d'incertitudes identifiées, ces résultats doivent être considérés comme une trajectoire prospective liée au maintien des tendances actuelles et aux hypothèses retenues pour la modélisation. Ils constituent ainsi davantage un outil d'alerte et d'aide à la décision qu'une trajectoire certaine de l'état futur de la zone Ramsar de N'Ganda N'Ganda.

Afin d'améliorer les performances du modèle prédictif et d'explorer des scénarii de conservation, des variables socio-économiques et climatiques pourraient être intégrées dans le modèle.

REFERENCES

- [1] Akadjé, L. M. C. & Hauhouot, C. 2021. Géoprospective des dynamiques spatiales futures : application au risque de déforestation de la zone humide (site Ramsar) de Grand-Bassam, Côte d'Ivoire. Acte du colloque du 6 décembre 2018 en hommage au Professeur Koby Assa Théophile. *L'HARMATTAN*. 5-7, rue de l'École-Polytechnique ; 75005 Paris. ISBN : 978-2-343-24969-8. pp. 101-115
- [2] Akaffou, T. A., Neuba, D. F. R. & Malan, D. F. 2020. Diversité floristique et valeur de conservation de la forêt classée de N'ganda N'ganda (sud-est de la Côte d'Ivoire). *Journal Scientifique Européen. ESJ*. 16 (36). 329p. <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n36p329>
- [3] Bohoussou, C. N. Dibi, H. N. Nanan, N. K. Guirmaisso, M. K. Aka, K. S. R. & Koffi, J. N. 2024. Dynamique spatio-temporelle des écosystèmes de mangroves sous pressions anthropiques dans le Sud-est du Parc national d'Azagny (PNA) de 1988 à 2020 au Sud de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological Chemical Sciences*. 18(1): 244-260. ISSN 1997-342X (Online). ISSN 1991-8631
- [4] Convention de Ramsar sur les zones humides. 2018. *Perspectives mondiales des zones humides : état des zones humides à l'échelle mondiale et des services qu'elles fournissent à l'humanité*. Secrétariat de la Convention de Ramsar. Gland. Suisse. 88p
- [5] Eldin, M. 1971. *Le milieu naturel de Côte d'Ivoire*, Editions ORSTOM, Paris, France. 108p.
- [6] Kouadio, K. P. Yaokokore-Beibro, H., Odoukpe, K. S. G. Konan, E. K. N'Guessan, M. & Kouassi, K. P. 2014. Diversité avifaunique de la forêt classée de N'Ganda N'Ganda (Sud-Est de la Côte d'Ivoire), *Afrique SCIENCE* 10(1) :181-193. ISSN 1813-548X

- [7] Landis, J. R. & Koch, G. 1977. Mesure de la concordance entre observateurs pour les données catégorielles, *La Société internationale de biométrie*, Vol. 33, n° 1, pp. 159-174, 16 p
- [8] Mastaki, G. A. 2023. La Convention de Ramsar et la protection des zones humides. ISBN : 978-620- 3-45381-2. Hal-04505510v2, 16p.
- [9] Ndikwé, D. M. Anaba B. C. R. & Aoudou D. S. 2026. Mise à contribution des automates cellulaires et de la chaîne de MARKOV dans la modélisation de l'occupation du sol dans les bassins versants aval de Lom Pangar. *Revue Internationale de la Recherche Scientifique (Revue-IRS)*. ISSN: 2958-8413. Vol. 4. No. 2. 20p
- [10] Osseni A. A. Gbesso, G. H. F. Idakou, G. N. Fandohan, A. B. Toko, I. & Tente, A. B. H. & Sinsin, B. A. 2023. Reconstitution spatiale et simulation des changements futurs de l'occupation du sol dans la Réserve de Biosphère de la basse vallée de l'Ouémé (RB-BVO) au Bénin. *Physio-Géo*. Volume 19. URL : <http://journals.openedition.org/physio-geo/15014>; DOI : <https://doi.org/10.4000/physio-geo.15014>
- [11] Sankare, Y. & Egnankou, W. M. et Comité National Ramsar de Côte d'Ivoire. 2005. *Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar*. 15p.
- [12] Sylla, D. Kouassi, A. & Hauhouot, C. 2022. Évolution de la forêt classée de N'Ganda N'Ganda (Assinie, Côte d'Ivoire) d'après la comparaison de deux images Landsat de 1987 et 2018. *Photo-Interpretation. European Journal of Applied Remote Sensing (PIEJARS)*. 56-57. pp.21-30. (hal-04925079).
- [13] Youhouin, F. O. 2019. *Caractérisation de l'évolution spatiale de la mangrove de la zone humide Ramsar de Grand-Bassam en Côte d'Ivoire de 1985 à 2030*. Mémoire en Développement de l'Université Senghor Département Environnement Spécialité Gestion des Aires Protégées. Université Senghor. Sénégal. 81p.