

Dynamique et prévision des changements d'usage des sols de l'Agro-forêt de Haute Dodo (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire)

[Dynamics and forecasting of land-use change in the Haute Dodo agroforest (southwestern Côte d'Ivoire)]

Yaya Doumbia¹, Atsu Dogbeda Hlovor², Béh Ibrahim Diomande¹, and Kouami Kokou³

¹Département de Géographie, Géographie physique, Université Alassane Ouattara, Bouaké, Côte d'Ivoire

²Laboratoire de Recherche Forestière, Université de Lomé, Lomé, Togo

³Centre de Recherche sur le Changement Climatique, Université de Lomé, Lomé, Togo

Copyright © 2024 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The Haute Dodo Agroforest has experienced a significant reduction in forest cover over the decades. In this context, the aim of this study is to analyze the dynamics of forest cover from 1986 to 2020 and from 2020 to 2050 for the land cover of the Haute Dodo Agro-forest. The methodological approach used is based on the use of geographic information systems (GIS) and prospective scenarios built using Land Change Modeler. The results show that crop-fallow and bare soil-habitat mosaics increase significantly, while wetlands and dense forests decrease significantly. The increase in bare soil-habitat mosaics and crop-fallow mosaics demonstrates the dominant role of human activities in land use dynamics. By 2050, the «Business As Usual» scenario shows a 6.82% decrease in dense forests, while the «Rapid Economic Growth» scenario shows an 8.41% decrease in dense forests. The «environmental sustainability coordinated» scenario, on the other hand, shows an 18.49% increase in the area of dense forest. These decision-support tools are relevant elements in the implementation of a policy aimed at reversing deforestation trends.

KEYWORDS: Agro-forestry, land use, deforestation, forecasting.

RESUME: L'Agro-forêt de Haute Dodo connaît une réduction importante de son couvert forestier au fil des décennies. Dans un tel contexte, l'objectif de cette étude est d'analyser la dynamique du couvert forestier de 1986 à 2020 et de 2020 à 2050 de l'occupation du sol de l'Agro-forêt de Haute Dodo. L'approche méthodologique utilisée est basée sur l'utilisation de systèmes d'information géographique (SIG) et de scénarios prospectifs construits à l'aide de Land Change Modeler. Les résultats montrent que les mosaïques de culture-jachère et sols nus-habitats augmentent significativement, tandis que les zones humides et les forêts denses diminuent significativement. La hausse des mosaïques de sols nus-habitats et des cultures-jachères montre le rôle dominant des activités humaines dans la dynamique de l'usage des sols. D'ici 2050, le scénario «Business As Usual» montre une diminution de 6,82 % des forêts denses, tandis que le scénario «Rapid Economic Growth» montre une diminution de 8,41 % des forêts denses. Le scénario «environmental sustainability coordinated», quant à lui, montre une hausse de 18,49 % de la surface de forêts denses. Ces outils d'aide à la décision sont des éléments pertinents dans la mise en œuvre d'une politique visant à inverser les tendances à la déforestation.

MOTS-CLEFS: Agro-forêt, utilisation des terres, déforestation, prévision.

1 INTRODUCTION

Depuis 1990, plus de 129 millions d'hectares de forêts ont été détruites à travers le monde [1]. À cette date, les forêts couvraient plus de 4,128 milliards d'hectares soit 31,6% de la surface des terres émergées. En 2015, ce chiffre n'atteint plus que 3,99 milliards d'hectares soit 30,6% de la surface. Le taux de déforestation semble avoir ralenti en passant de 0,18% par an dans les années 90 à 0,08% durant la période 2010-2015, mais malgré ce ralentissement, le déboisement continue. C'est en Afrique que la déforestation a été la plus prononcée entre 2010 et 2015, avec une perte de 2,8 millions d'hectares, suivie de l'Amérique du Sud avec une perte de 2 millions d'hectares sur la même période [1].

Au lendemain de son indépendance, à l'instar de la plupart des pays africains, la Côte d'Ivoire a orienté sa politique de développement socio-économique sur la promotion de l'agriculture et l'exploitation du bois. Cette politique mal encadrée a engendré une ruée massive des populations d'origines diverses vers les zones forestières pour participer à l'essor de l'économie ivoirienne. Cette activité agricole occupe près de 70 % de la population active, contribue pour 26 % à la constitution du PIB et procure 60 % des recettes d'exportation du pays [2]. Cette situation a engendré d'énormes pressions sur le massif forestier. De plus 16 millions d'hectare en 1960, la surface forestière est passée à moins de 2 millions d'hectare en 2015 [3].

Aujourd'hui, les dernières ressources forestières sont en majorité confinées dans les zones protégées. En 2015, 64% des forêts ivoiriennes se trouvaient dans les forêts classées et aires protégées. Cependant, les points critiques actuels de la déforestation sont localisés dans les forêts classées où le taux annuel de déforestation était de 3 % sur la période 1990-2000 et de 4,2 % sur la période 2000-2015 [4]. Il ne restait plus que 844 938 hectares de forêts classées en 2015 contre 2 129 729 hectares en 1990 [5]. La situation forestière du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire illustre bien ce contexte ivoirien. En effet, il est le plus exposé à la disparition du couvert forestier à cause de l'existence d'importants fronts pionniers aux limites des massifs forestiers protégés [6]. Selon une cartographie récente, la dynamique de l'occupation du sol du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire montre une forte dégradation des surfaces forestières au profit des surfaces agricoles de 1986 à 2015. En effet, les formations forestières qui occupaient plus de 46% du Sud-Ouest ivoirien en 1986 sont passées à seulement 13 % en 2015 [7].

En conséquence, les défis actuels de l'administration forestière ivoirienne sont la reforestation du pays avec un taux de couverture forestière de 20% à l'horizon 2040 et la mise en œuvre d'une politique de préservation de la forêt ivoirienne tout en développant l'agriculture [8]. Or, ces défis passent par un suivi régulier de la dynamique des affectations des terres afin de proposer des opportunités de restauration du couvert forestier.

Cette étude vise à prédire l'évolution de l'usage des terres de l'agro-forêt de Haute Dodo dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire à l'horizon 2050 à partir de scénarios prospectifs pour une gestion durable surfaces forestières. L'exploration des futurs possibles permettra aux différents acteurs (pouvoirs publics et populations) de prévoir les actions à mener en matière de gestion des ressources forestières dans les aires protégées du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire.

2 MATERIELS ET METHODES

2.1 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Du point de vue géographique, la forêt classée de Haute Dodo est située au Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire dans le district du Bas-Sassandra. Elle se localise entre les latitudes 4°41'21" et 5°26'42" Nord et les longitudes 7°06'13" et 7°25'36" Ouest (Figure 1). Elle est constituée par le massif d'un seul tenant avec une superficie de 196733 ha. Elle relève de la région administrative de San-Pedro. Elle s'étend sur deux départements dont celui de Tabou et de San-Pedro.

Le climat est de type équatorial de transition, avec un régime bimodal, alternant saisons des pluies et saisons sèches. Il s'agit d'une grande saison de pluie d'avril à juin, une petite saison sèche de juillet à août, une petite saison de pluie de septembre à novembre et une grande saison sèche de décembre à mars. La proximité de l'Océan atlantique et de cours d'eau côtiers gouverne la température de ce milieu. Les variations thermiques sont réduites et les températures moyennes oscillent entre 24 et 27 °C dans cette région. La diversité de la topographie donne lieu à des précipitations comprises entre 1200 et 1500 mm par an pour une moyenne de 110 jours cumulée de pluie.

Le contexte biogéographique est complexe. En effet, les formations végétales dominantes sont les forêts sempervirentes et les forêts semi-décidues. Les espèces dominantes sont les espèces à *Eremospatha spp* et à *Diaspyros mannii spp*. Ces formations végétales sont composées de trois grands secteurs biogéographiques: le secteur ombrophile, mésophile et littoral. Le secteur ombrophile est le plus étendu dans cette région.

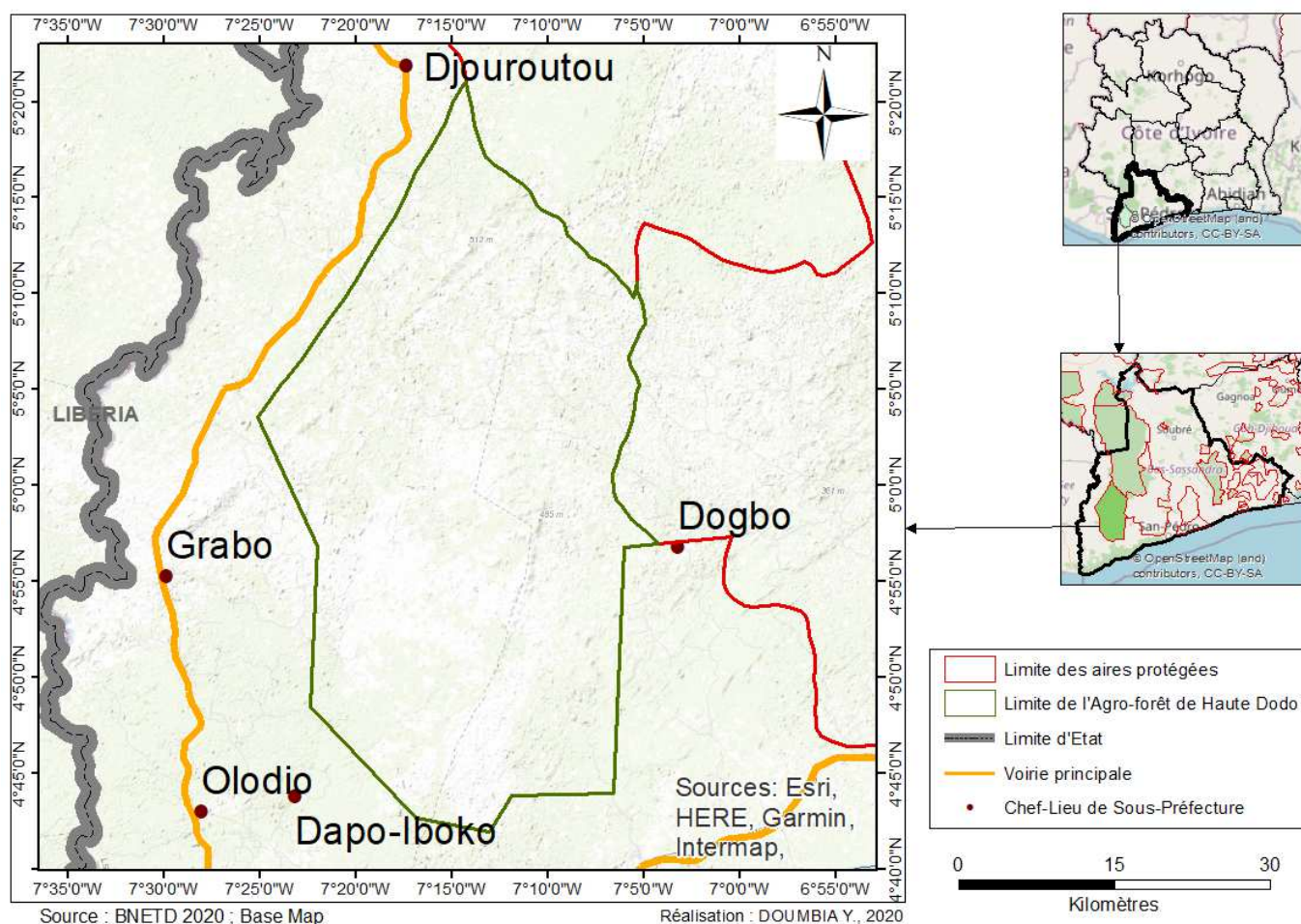


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude

Cette forêt abrite un fort potentiel agricole, d'exploitation des ressources forestières et de développement touristique. Les principales cultures qui y sont le *Theobroma cacao*, le *Coffea canephora*, l'*Elaeis guineensis* et dans une moindre mesure l'*Hevea brasiliensis* et le *Cocos nucifera*.

2.2 MATÉRIELS

Le suivi de la dynamique des surfaces forestières a été réalisé à partir d'images Landsat téléchargées sur le site www.earthexplorer.usgs.gov au format Geotiff (Path 197 et Row 056-057). Les images issues de 3 capteurs de la série Landsat ont été utilisées (Tableau 1). La date de 1986 a été choisie, car précédant l'année 1992 où la gestion de l'ensemble des forêts classées a été confiée à la SODEFOR par arrêté n°033/MINAGRA du 13 février 1992. Le choix de celles de 2000 et 2010 se justifie par le fait qu'elles permettent d'évaluer l'impact du début et la fin de la crise militaro-politique sur la gestion des forêts et aires protégées par l'Etat ivoirien. L'année 2020 permet d'actualiser les données sur l'évolution de la forêt.

Tableau 1. Types d'images satellites utilisés

Type	Date	Format	Résolution	Source
Landsat TM	1986-01-16	Tiff	30	USGS
Landsat ETM+	2000-02-18			
Landsat ETM +	2010-12-29			
Landsat OLI-TIRS	2020-02-12			

Ces images ont été acquises dans la même période de l'année afin de réduire les problèmes de différences des angles solaires, de changements phénologiques de la végétation et de différences d'humidité des sols. La haute résolution spatiale de ces images Landsat a permis de caractériser sans grande difficulté les éléments paysagers forestiers.

2.3 MÉTHODES

Les méthodes de traitement des données se résument aux relevées de points GPS, au prétraitement et au traitement des images satellitaires, la validation de la classification et les méthodes d'évaluation spatiale.

➤ Relevées de points GPS

Par ailleurs, les relevées GPS, ont été d'un apport déterminant dans la compréhension de la dynamique de surface forestière et l'évaluation statistique des différentes formations d'occupation du sol. La détection des différentes formations d'occupation du sol à partir des seules images satellites reste tout de même laborieuse. Ainsi, plusieurs levés de terrain ont été effectués, pendant la saison sèche (janvier et février) et la saison pluvieuse (mai et juin). Ces levés avaient pour but de faire une reconnaissance spatiale afin d'avoir une estimation précise de la position géographique des formations forestières.

➤ Prétraitement des images satellitaires

Le prétraitement facilite l'interprétation des images en vue d'une meilleure extraction de l'information géographique. Ce prétraitement se résume à la correction radiométrique et à la correction géométrique.

Cette première étape consiste à passer des valeurs brutes des pixels de l'image à la luminance. Cette dernière est donnée par la formule proposée par [9]:

$$L_y = \left(\frac{L_{MAXy} - L_{MINy}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) \times (Q_{cal} - Q_{calmin}) + L_{MINy} \quad (1)$$

Où L_y correspond à la bande spectrale brute convertie en luminance, L_{MAXy} et L_{MINy} sont les luminances maximum et minimum de la bande spectrale, fournie dans les métadonnées Landsat, Q_{calmax} , Q_{calmin} correspondant aux valeurs Q_{cal} données dans les métadonnées et Q_{cal} correspondant à la bande brute que l'on veut corriger. Après cette opération, les valeurs des pixels ne sont plus des comptes numériques bruts, mais des pourcentages de réflectance au sol.

Les images Landsat sont téléchargées en format L1T « MTL.txt » et sont donc déjà projetées en coordonnées UTM WGS84. Cependant, comme les images disponibles ont été acquises à différentes dates et par différents capteurs, il est nécessaire de les rendre strictement superposables les unes par rapport aux autres afin d'appliquer une approche multi temporelle et de limiter les erreurs dans les intercomparaisons. Elle implique un calage des images entre elles réalisé à partir de points d'amers. En fonction du nombre et de la répartition spatiale de ces points d'amers, l'image sera plus ou moins bien superposable à une autre en fonction des espaces.

➤ Traitement des images satellitaires

Cette étape a permis de classer les images à travers diverses méthodes: la classification non supervisée, le choix de parcelles d'entraînement et la classification supervisée.

La classification non supervisée a été une étape intermédiaire et a permis de parvenir à une simplification radiométrique de l'image brute, rendue plus facilement interprétable et de faire correspondre au mieux la réalité radiométrique à la réalité thématique. Cette étape de la classification a permis d'identifier les différentes formations d'occupation du sol de façon automatique. Pour cette étude, la classification supervisée « Maximum de Vraisemblance (MDV) » a été utilisée pour classer les images. Cet algorithme est très utilisé dans les classifications supervisées et est considéré comme le plus performant dans le domaine de l'occupation du sol [10].

La validation des cartes d'occupation du sol issues de l'interprétation des images satellitaires a été faite à partir d'une matrice de confusion. Il s'agit en fait d'un tableau à doubles entrées où les classes des unités d'occupation du sol se trouvent en lignes et les données du contrôle-terrain en colonnes. Ce rapport statistique réalisé sur la base des parcelles de contrôles permet d'évaluer la capacité des images satellitaires à discriminer les différentes classes de végétation retenues. Cette validation a été réalisée également à l'aide de l'indice Kappa. Selon [11], l'indice Kappa s'étend de 0 à 1 et se divise en cinq catégories. Il s'agit de la classe de très faible (0 à 0,2); classe de faible (0,21 à 0,4); classe de modéré (0,41 à 0,6); classe de substantiel (0,61 à 0,8) et la classe de presque parfait (0,81 à 1).

➤ Evaluation spatiale des formations forestières

L'analyse diachronique des images a permis de mieux apprécier la dynamique de l'occupation du sol. Les taux de transformation annuelle sont évalués par la formule suivante [12]:

$$T = \left[1 - \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \times 100 \quad (2)$$

Avec T = taux de conversion; S1 = superficie du thème à la date 1; S2 = superficie du thème à la date 2 et n = nombre d'année entre les deux dates (t_2-t_1). La variable considérée est la superficie (S). Ainsi, pour S₁ et S₂, correspondant respectivement à la superficie d'une catégorie d'occupation du sol à la date t₁ et t₂, le taux de transformation et d'expansion spatiale moyen annuel (T) des différentes classes d'occupation du sol.

➤ Caractéristiques de la végétation de l'Agro-forêt de Haute Dodo

Les rapports liés à l'état des formations forestières et des critères physiologiques (le degré de couverture du sous-bois) tels que décrits par [13] et [14] ont respectivement permis d'apprécier la structuration horizontale de chacune des formations végétales. La dénomination des formations végétales rencontrées sont les forêts denses, les forêts claires et les mosaïques de cultures et de jachères (Figure 2).

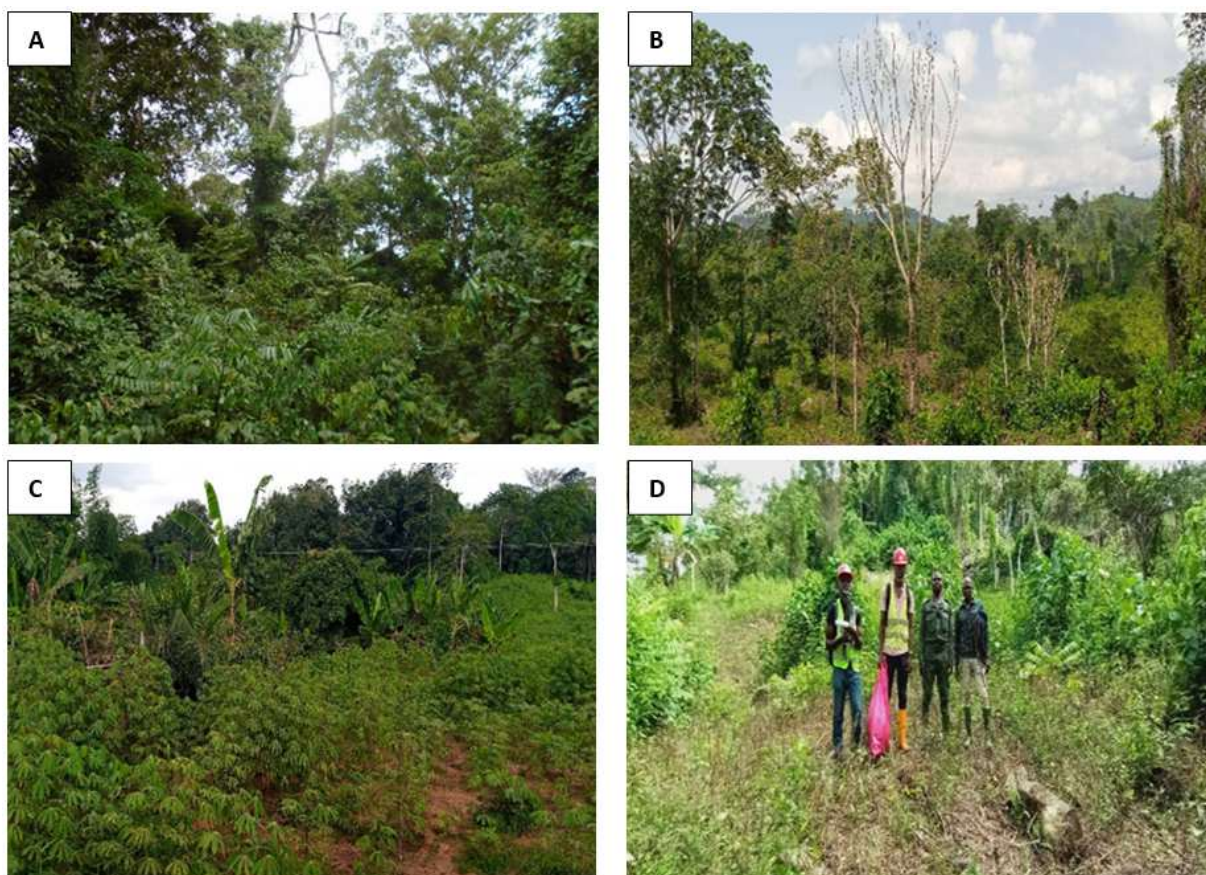


Fig. 2. Principales formations végétales dans l'Agro-forêt de Haute Dodo
A: Forêt dense; B: Forêt claire/dégradée; C: Culture; D: Jachères

Les Forêts denses correspondent aux formations de forêts climatiques fermées ou de "forêts noires" décrites par [15]. Ces formations regroupent les forêts humides denses, les forêts marécageuses, les forêts périodiquement inondées et les forêts ripicoles. Les Forêts dégradées correspondent aux forêts secondaires selon la classification de [16]. Une sorte de broussaille s'installe et est remplacée par une petite forêt de type secondaire. Le deuxième facteur de dégradation est la coupe fréquente de bois de grume qui crée des trouées plus ou moins grandes dans la canopée. Les mosaïques de cultures et de Jachères constituent la phase la plus avancée de la dégradation de la végétation comparativement aux forêts secondaires [17]. Ces espaces sont occupés par une friche à dominance de *Chromolaena odorata* (Asteraceae).

Pour sélectionner les principales formations végétales en vue d'en faire une cartographie d'occupation du sol, nous nous sommes basés sur les observations de terrain et l'analyse visuelle des images. Ainsi, les missions de terrain ont permis de parcourir les différents paysages étudiés dans l'agro-forêt de Haute Dodo.

➤ Simulation de l'occupation du sol

La simulation a été faite avec le Land change Modeler (LCM). C'est un modèle générique conçu pour la simulation des changements d'usage des sols [18]. LCM évalue les changements de couverture terrestre entre deux dates T1 (initiale) et T2 (final). Il calcule les modifications et affiche les résultats sous forme statistique et cartographique. Il prévoit le couvert forestier futur sur la base de potentiel de transition relative (Figure 3).

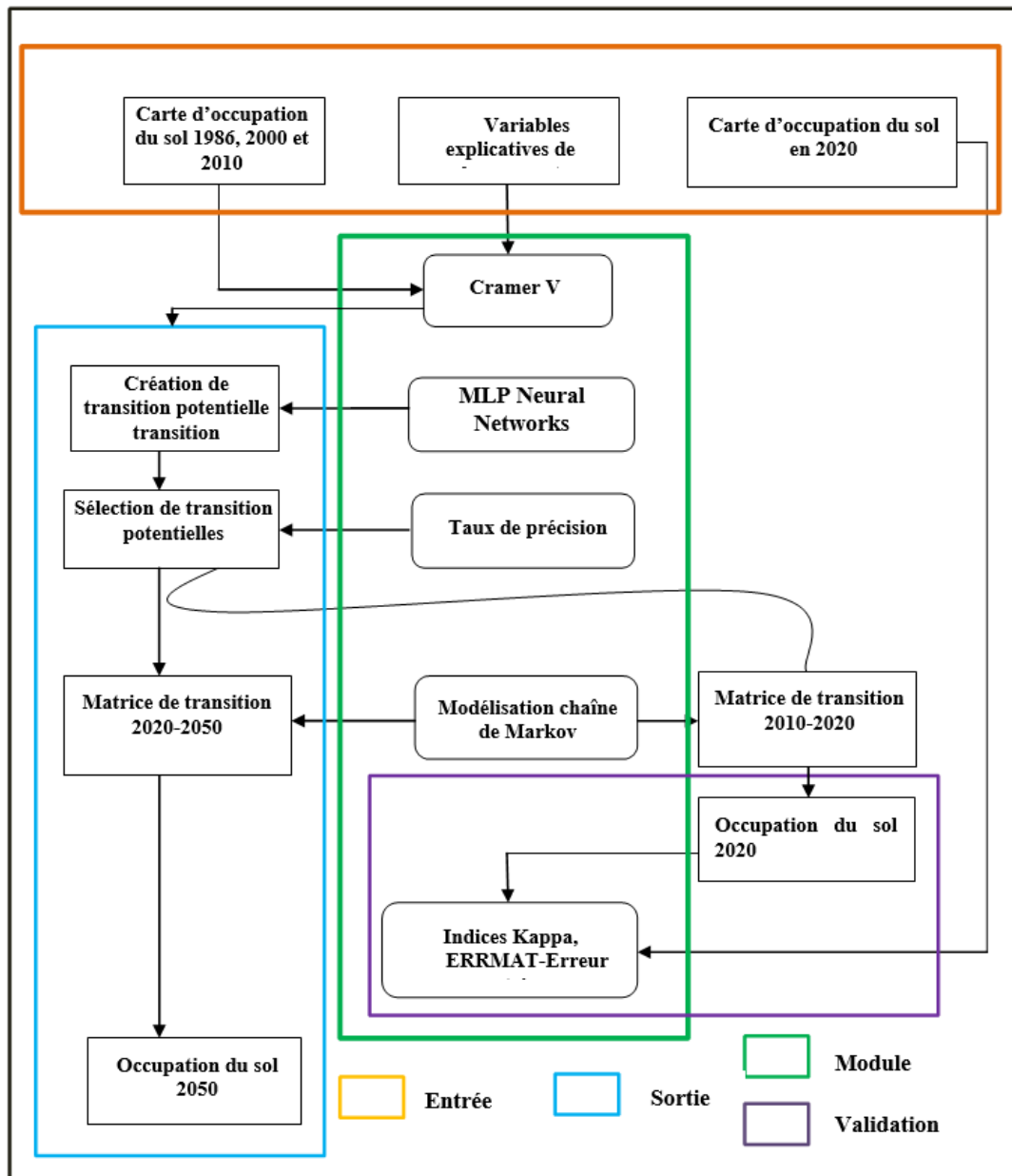


Fig. 3. Diagramme des étapes du modèle Land change Modeler de l'étude

Source: Adapté de Bougoussou G. F., 2017

Ce modèle est constitué de trois étapes majeures: l'entrée de données, les traitements (modules), la validation et les résultats de prédiction. Les variables utilisées dans le modèle d'entrée sont constituées de « distance par rapport aux

habitations », « distance par rapport aux cours d'eau » et « distance par rapport aux routes ». La prédiction des changements d'occupation de sol dans la modélisation LCM se base sur le changement historique de la date T1 à la date T2 des cartes d'occupation du sol pour projeter les scénarios futurs. L'analyse des changements est évaluée entre deux cartes d'occupation du sol (T1 et T2). La procédure d'allocation spatiale des changements d'occupation du sol se fait par affectation multi-objectif (MOLA), qui se couple à l'estimation de la quantité de changement effectuée par des chaînes de Markov. La deuxième étape dans le processus de prédiction est la modélisation du potentiel de transition, où des classes potentielles à se convertir en d'autres classes sont identifiées. Ces cartes de potentiel de transition sont organisées dans un sous-modèle de transition évalué à l'aide des chaînes de Markov. Les transitions sont modélisées à l'aide d'un réseau neuronal de perception multicouches (MLP). Les transitions potentielles sont retenues lorsque le taux de précision est supérieur à 70%. Une fois calibré, le modèle est utilisé pour prédire les scénarios futurs. En utilisant les taux historiques de changement, le LCM prédit les scénarios futurs pour une date future spécifiée. La matrice de probabilités de transition affiche la probabilité que chaque formation du sol se transforme en une autre catégorie.

➤ Description des scénarios utilisés

Dans le cadre de cette étude, trois scénarios ont été élaborés pour prédire l'évolution de l'occupation du sol de l'Agro-forêt de Haute Dodo. Il s'agit de:

- Scénario **“Business As Usual”**

Le scénario 1 est un scénario tendanciel qui part de l'hypothèse de l'absence de nouvelles politiques économiques ou environnementales. C'est un scénario dans lequel les changements futurs des surfaces forestières suivent les tendances observées antérieurement. Il s'appuie sur les données socio-économiques passées et récentes (1986-2020) notamment les activités agricoles et l'exploitation massive des ressources forestières et la croissance démographique.

- Scénario **“Rapid Economic Growth”** ou de rupture redoutée

Ce scénario annonce l'accélération de la dégradation du couvert forestier et l'intensification des actions anthropiques. Dans ce scénario, la croissance démographique et les activités socio-économiques seront très élevées conduisant à une augmentation des surfaces anthropisées. C'est un scénario pessimiste dans lequel aucune disposition n'est prise pour protéger les ressources forestières du milieu d'étude.

- Scénario **“environmental sustainability coordinated”** ou de rupture souhaitée

Le principal objectif du scénario est de protéger le reste des surfaces forestières en encourageant la pratique d'une agriculture durable et d'une exploitation forestière responsable. C'est un scénario dans lequel la législation et les subventions gouvernementales encouragent la multiplication de l'agroforesterie et la protection des ressources ligneuses qui constituent des réservoirs de carbone. Ce scénario envisage une évolution radicale des modes d'exploitation du sol par la préservation intégrale du territoire juridique de l'agro-forêt, une reconquête maximale des zones de cultures et des sols dégradés.

3 RÉSULTATS

3.1 ANALYSE DE LA DYNAMIQUE ACTUELLE DE LA FORET CLASSEE DE HAUTE DODO

La classification a été réalisée avec une précision globale respective de 94,06%, 94,92%, 93,27% et 93,29%. En outre, les indices de Kappa sont estimés respectivement à 0,927 (1986), 0,939 (2000), 0,919 (2010) et à 0,912 (2020). Cette classification a permis d'identifier six unités d'occupation du sol dans la forêt classée de Haute Dodo: forêts denses, forêts dégradées, zones humides, mosaïques de cultures-jachères et mosaïques de sols nus-habitations (Tableau 2).

Tableau 2. Matrice de confusion de la classification supervisée de 1986, 2000, 2010 et 2020

1986	Forêt dense	Forêt dégradé	Cultures-Jachères	Sol nu-Habitation	Zone humide	Cours d'eau
Forêt dense	99,13	0	0	0	4,88	0
Forêt dégradé	0,87	94,81	6,29	0	0	0
Cultures/jachères	0	3,58	90,13	9,43	1,36	0
Sol nu/habitation	0	1,61	3,58	89,39	1,17	0
Zone humide	0	0	0	1,18	92,59	1,64
Cours d'eau	0	0	0	0	0	98,36
Total	100	100	100	100	100	100
Indice Kappa : 0,927						
Précision globale : 94,06						
2000	Forêt dense	Forêt dégradé	Cultures-Jachères	Sol nu-Habitation	Zone humide	Cours d'eau
Forêt dense	90,77	2,51	0	0	3,75	0
Forêt dégradé	6,97	85,39	5,18	0	0	0
Cultures/jachères	0,38	10,49	92,39	7,07	2,63	0
Sol nu/habitation	0	1,61	0	90,99	3,43	0
Zone humide	1,88	0	2,43	1,94	87,76	1,43
Cours d'eau	0	0	0	0	2,43	98,57
Total	100	100	100	100	100	100
Indice Kappa : 0,939						
Précision globale : 94,92						
2010	Forêt dense	Forêt dégradé	Cultures-Jachères	Sol nu-Habitation	Zone humide	Cours d'eau
Forêt dense	98,44	0	0	0	5,08	0
Forêt dégradé	1,09	90,08	7,82	0	1,42	0
Cultures/jachères	0,47	8,01	87,49	9,33	1,21	0
Sol nu/habitation	0	1,91	4,69	90,18	3,14	0
Zone humide	0	0	0	0,49	89,15	2,14
Cours d'eau	0	0	0	0	0	97,86
Total	100	100	100	100	100	100
Indice Kappa : 0,919						
Précision globale : 93,27						
2020	Forêt dense	Forêt dégradé	Cultures-Jachères	Sol nu-Habitation	Zone humide	Cours d'eau
Forêt dense	92,39	0	0	0	5,33	0,32
Forêt dégradé	2,74	86,5	8,29	0	0	0
Cultures/jachères	0,42	11,65	88,97	5,21	0	0
Sol nu/habitation	0,28	1,68	1,71	93,67	0	0
Zone humide	4,17	0,17	1,03	1,12	93,89	3,19
Cours d'eau	0	0	0	0	0,78	96,49
Total	100	100	100	100	100	100
Indice Kappa : 0,912						
Précision globale : 93,29						

De façon générale, ces unités d'occupation du sol sont bien classifiées avec une précision supérieure à 90% et un indice de Kappa compris entre 0,81 et 1.

3.2 DISTRIBUTION SPATIALE DES ENTITES D'OCCUPATION DU SOL

En 1986, la physionomie de cette forêt était largement dominée par la forêt dense avec une superficie de 120324 ha (Figure 4). Cette végétation a connu une réduction passant ainsi à une superficie de 96635 ha en 2000 à 30752 ha en 2010 et à 12753 ha en 2020 (Tableau 3). Par ailleurs, l'on remarque une hausse des mosaïques cultures-jachères et celles de sols nus-

habitations. Les surfaces de mosaïques de cultures-jachères sont passées de 4659 ha en 1986 à 38845 ha en 2000 puis à 65960 ha en 2010 et à 77960 ha en 2020.

En ce qui concerne la mosaïque de sols nus-habitations, elle est passée de 5842 ha en 1986 à 19412 ha en 2000, puis à 15722 ha en 2010 et à 58622 ha. L'accroissement du taux d'infiltration dans cette forêt classée témoigne de la régression dans le même temps du couvert végétal de ladite forêt. En effet, l'année 2000 coïncide avec le début de la crise politico-militaire qu'a connue la Côte d'Ivoire.

Un deuxième facteur affectant les superficies, bien que moins important, est la variation du niveau des plans d'eau. Les surfaces de forêt dense, de forêt dégradée et de zones humides ont connu une régression avec des taux respectif de -1,53%, -12,10% et -0,43% entre 1986 et 2000. Par contre, les surfaces de cultures-jachères, les surfaces anthropisées et dénudées ont progressé respectivement de 5,50% et de 4,37% annuellement.

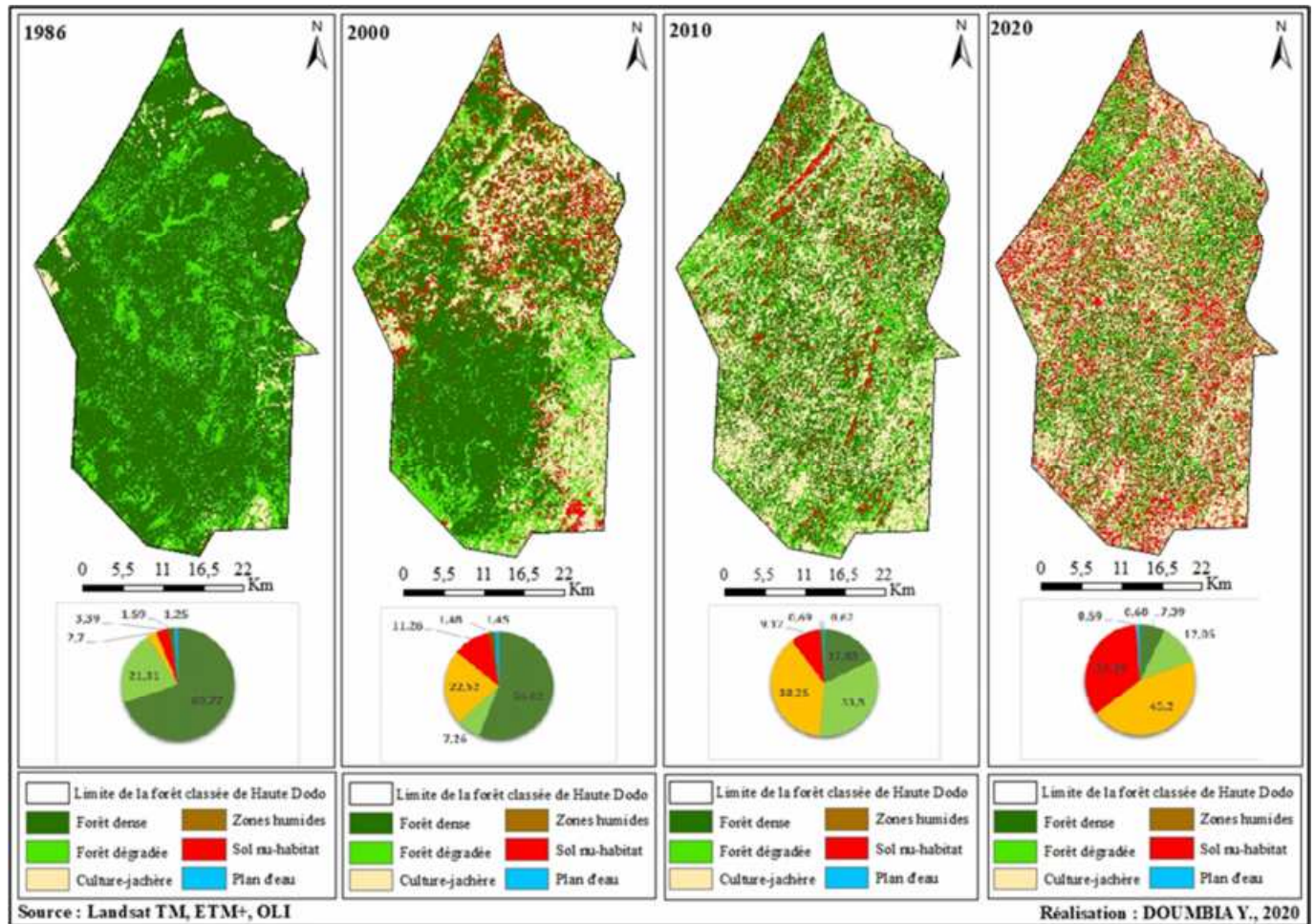


Fig. 4. Occupation du sol de l'Agro-forêt de Haute Dodo

Entre 2000 et 2010, les surfaces de forêts denses, les mosaïques de sols nus-habitations, les zones humides et les cours d'eau ont connu un taux de régression respectifs de -21,42%, -2,35%, -11,59%, -13,48% alors que les mosaïques de cultures-jachères (4,11%) ont connu une progression. De 2010 à 2020, les régressions annuelles les plus importantes concernent les surfaces de forêts denses (-14,11%) et de forêts dégradées (-17,81%). Les mosaïques de sols nus-habitations et de cultures-jachères ont progressé respectivement de 7,32% et de 1,54%.

Tableau 3. Catégories d'occupation du sol dans la forêt classée de Haute Dodo

Année	1986		2000		2010		2020	
	Surf. (ha)	Prop. (%)	Surf. (ha)	Prop. (%)	Surf. (ha)	Prop. (%)	Surf. (ha)	Prop. (%)
FD	120324	69,77	96635	56,03	30752	17,83	12753	7,39
FE	36743	21,31	12514	7,26	57778	33,50	20778	12,05
CJ	4659	2,7	38845	22,52	65960	38,25	77960	45,20
SNH	5842	3,39	19412	11,26	15722	9,12	58622	33,99
ZH	2737	1,59	2559	1,48	1186	0,69	1185	0,69
CE	2158	1,25	2498	1,45	1064	0,62	1164	0,68
Total	172463	100	172463	100	172463	100	172463	100

FD: Forêt dense; FE: Forêt dégradée; CJ: Cultures/Jachères; SNH: Sol nu/habitations; ZH: Zone humide; CE: Cours d'eau

3.3 ÉVOLUTION FUTURE DE L'OCCUPATION DU SOL DE LA FORET CLASSEE DE HAUTE DODO

L'évolution future de l'occupation du sol dans la forêt classée de Haute Dodo met en évidence des changements opérés par les unités paysagères à l'horizon 2050 selon le scénario envisagé avec une certitude de 72,12%. Ces changements montrent l'apparition de nouvelles surfaces de cultures/jachères selon les scénarios 1 et 2 et une régénérescence de la végétation selon le scénario 3. En 2070, l'on constate un maillage de toute la forêt par les cultures-jachères. Ce constat est visible dans la mesure où les surfaces de forêts naturelles diminueront au fil des années. Les cartes d'occupation indiquent une progression des mosaïques de cultures-jachères, des mosaïques de sols nus-habitations et des forêts dégradées (Figure 5).

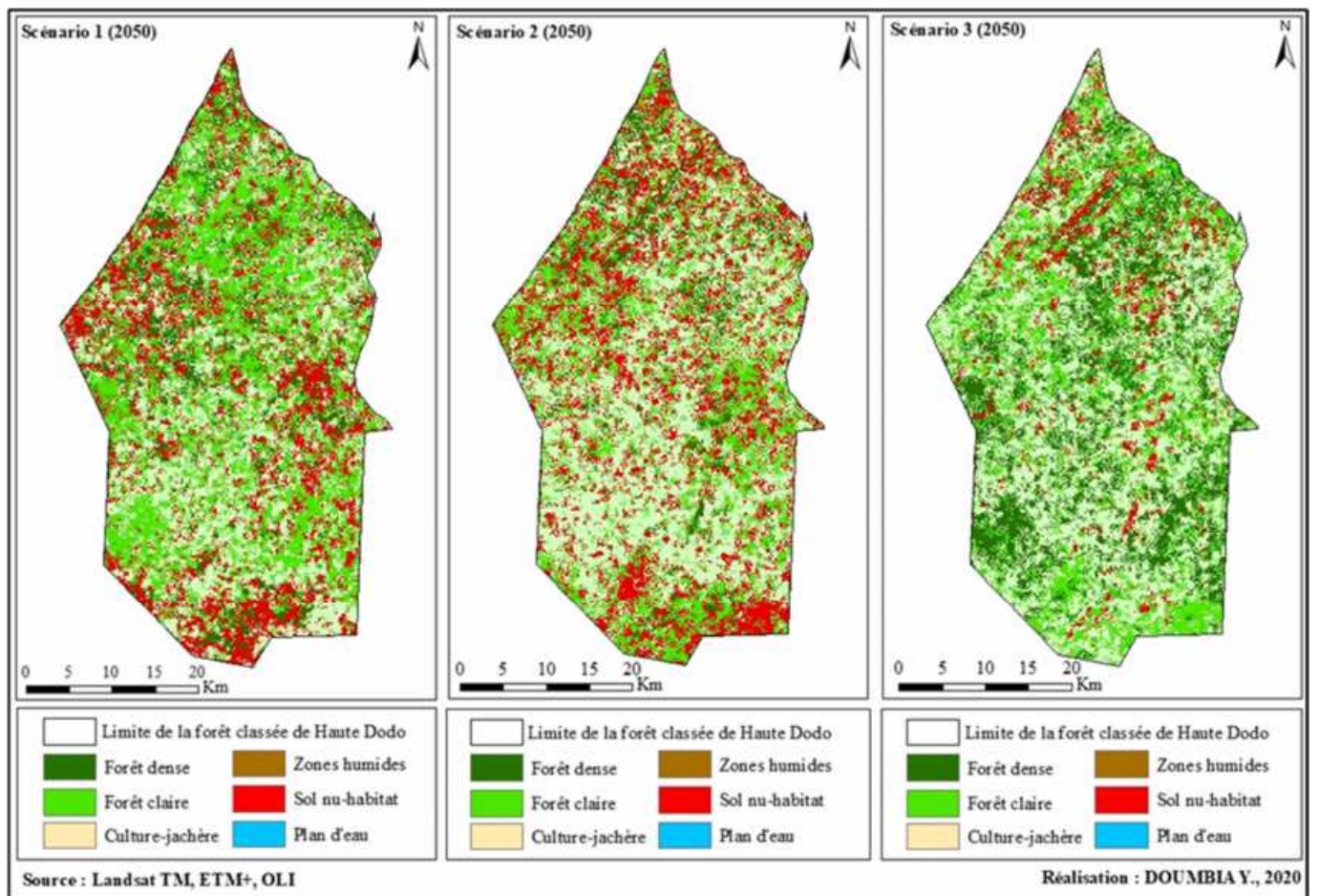


Fig. 5. Changements futurs de l'occupation du sol de 2050 de l'Agro-forêt de Haute Dodo

L'analyse de la matrice de Markov a permis d'obtenir les probabilités de transitions de chaque classe d'occupation du sol à se transformer en d'autres classes au cours de la période considérée (2020-2050). Le scénario 1 met en évidence une tendance régressive au profit de la forêt dégradée, mosaïques de cultures-jachères et mosaïques de sols nus-habitations (Tableau 4). La forêt dégradée regressera également au profit des cultures-jachères et sols nus/habitations.

Tableau 4. Probabilité de transition entre 2020 et 2050 selon le scénario "Business As Usual"

2020-2050	FD	FE	CJ	SNH	ZH	CE
FD	0,09	0,28	0,47	0,37	0	0
FE	0	0,1	0,24	0,31	0,01	0,01
CJ	0	0,03	0,14	0,21	0	0
SNH	0,01	0,04	0,2	0,07	0,01	0
ZH	0,1	0,27	0,33	0,38	0,03	0,05
CE	0	0	0,05	0	0	0

FD: Forêt dense; FE: Forêt dégradée; CJ: Cultures/Jachères; SNH: Sol nu/habitations; ZH: Zone humide; CE: Cours d'eau

Quant aux mosaïques de cultures/jachères, elles seront remplacées par les sols nus/habitations avec une probabilité de 0,21. En ce qui concerne les mosaïques de sols nus-habitations, elles auront une possibilité de se transformer en cultures-jachères avec une probabilité de 0,2. Enfin les zones humides baisseront au profit des forêts dégradées, des mosaïques de cultures-jachères et des mosaïques de sols nus/habitations.

Quant au scénario 2, il a mis en évidence une hausse des surfaces de cultures-jachères. Ainsi le recul de la végétation naturelle se fera au profit de la forêt dégradée, cultures-jachères et sols nus-habitations (Tableau 5). Les surfaces de forêts dégradées baisseront au profit des cultures-jachères et sols nus-habitations. Les cultures-jachères seront remplacées par les surfaces de sols nus/habitations. Les sols nus-habitations se transformeront en cultures-jachères avec une probabilité de 0,22. Les zones humides se transformeront en forêt dégradée, cultures-jachères et sols nus-habitations.

Tableau 5. Probabilité de transition entre 2020 et 2050 selon le scénario "Rapid Economic Growth"

2020-2050	FD	FE	CJ	SNH	ZH	CE
FD	0,03	0,32	0,25	0,35	0	0
FE	0	0,01	0,31	0,38	0,03	0,02
CJ	0	0,15	0,09	0,33	0	0
SNH	0	0	0,22	0,08	0	0
ZH	0,11	0,31	0,34	0,37	0,03	0
CE	0	0	0	0,16	0,14	0,2

FD: Forêt dense; FE: Forêt dégradée; CJ: Cultures/Jachères; SNH: Sol nu/habitations; ZH: Zone humide; CE: Cours d'eau

Par ailleurs, le scénario 3 est marquée par une tendance régressive des surfaces artificialisées. Ainsi, les surfaces de forêts denses progresseront au détriment de forêts dégradées, des mosaïques de cultures/jachères et sols nus/habitations (Tableau 6). Les forêts dégradées seront remplacées par les sols nus/habitations et cultures/jachères. Les mosaïques de cultures-jachères seront remplacées par les sols nus-habitations avec une probabilité de 0,44. En ce qui concerne les surfaces de sols nus-habitations, elles auront une probabilité de 0,26 d'être remplacées en mosaïques de cultures-jachères. Les zones humides seront transformées en mosaïques de cultures-jachères et celles de sols nus-habitations avec une probabilité respective de 0,31 et 0,28. Ainsi, le scénario 1 est marqué par une tendance régressive du domaine forestier dense.

Tableau 6. Probabilité de transition entre 2020 et 2050 selon le scénario "environmental sustainability coordinated"

2020-2050	FD	FE	CJ	SNH	ZH	CE
FD	0	0,41	0,4	0,35	0	0
FE	0	0,03	0,41	0,43	0	0
CJ	0	0,12	0,06	0,44	0	0
SNH	0	0,11	0,26	0,33	0	0
ZH	0,1	0,09	0,31	0,28	0,23	0
CE	0	0	0	0,13	0,1	0,1

FD: Forêt dense; FE: Forêt dégradée; CJ: Cultures/Jachères; SNH: Sol nu/habitations; ZH: Zone humide; CE: Cours d'eau

Il met en évidence l'accroissement des espaces anthropisés notamment les forêts dégradées, cultures-jachères et sols nus-habitations au détriment des forêts denses et des zones humides. Il est également noté une baisse significative des cours d'eau dans ce scénario en 2050 dans cette forêt classée.

De même le scénario 2 marque un recul remarquable des espaces naturels (-10,95% de forêts denses et -6,67% de zones humides et -7,19% de cours d'eau). Aussi, projette-il une progression significative des espaces anthropisés (31,34% de forêts dégradées, 29,86% de surfaces de cultures-jachères) (Tableau 7). Par contre le scénario 3 marque une évolution nettement par rapport à 2020 avec une régression générale des surfaces anthropisées avec -17,21% des surfaces de cultures-jachères et -36,09% des surfaces des sols nus-habitations au profit des surfaces naturelles boisées (forêts denses (+18,69%) et zones humides (+7,11%)). Il sera constaté une stabilité des cours d'eau (1,09%).

Tableau 7. Évolution des changements d'occupation du sol en 2050 par rapport à la situation en 2020 selon le scénario envisagé

Catégories	2020		Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
	Surface (ha)	Proportion (%)	Évolution (%)	Évolution (%)	Évolution (%)
FD	57 992	33,63	-6,82	-8,41	18,69
FE	37371,64	21,67	9,95	-10,95	15,05
CJ	35960,03	20,85	22,08	31,34	-17,21
SNH	2 164	1,25	28,8	29,86	-36,09
ZH	2 185	1,27	-2,82	-6,67	7,11
CE	36 790	21,33	-7,18	-7,19	1,09
Total	172463,16	100			

FD: Forêt dense; FE: Forêt dégradée; CJ: Cultures/Jachères; SNH: Sol nu/habitations; ZH: Zone humide; CE: Cours d'eau

4 DISCUSSION

A la lumière de ces analyses, on peut dire que le couvert végétal est sous l'influence des activités humaines dans l'Agro-forêt de Haut Dodo. Les formations végétales naturelles (forêts denses et zones humides) ont régressé au profit des formations végétales anthropisées (mosaïque de cultures et de jachères). Ces résultats sont en accord avec ceux [7] dans le sud-ouest de la Côte d'Ivoire. En effet, ils notent dans leur étude une disparition alarmante du couvert forestier depuis 1986 à cause de la coupe illégale de bois et l'expansion de l'exploitation industrielle. Des causes similaires sont observées dans plusieurs pays tropicaux notamment la Tanzanie, le Bénin et le Togo où les populations exploitent les terres forestières encore disponibles dans les aires protégées pour satisfaire leurs besoins fonciers et alimentaires croissants. Dans ces pays, l'exploitation agro-industrielle ou la construction d'infrastructures de développement sont responsables de moins de 3% des pertes de surfaces forestières ([19]; [20], [21]).

Globalement, la tendance évolutive des formations végétales dans cette étude est régressive au profit de celle des formations anthropiques. L'augmentation de ces entités d'occupation des sols peut s'expliquer par la croissance rapide de la population et donc par le besoin de nourriture et d'espace viable. Ceci est en accord avec l'étude de [22] menée dans le secteur de Natitingou-Boukombé (Nord-Ouest du Bénin) et qui explique la demande croissante en terres cultivées. Ces résultats confirment l'hypothèse d'un scénario tendanciel selon laquelle la tendance régressive du couvert végétal semble se poursuivre dans le futur avec les pratiques actuelles d'utilisation des terres forestières.

Par ailleurs, une variété de modèles a été développée pour simuler les changements futurs de l'occupation du sol depuis le début des années 1970. Il s'agit des modèles de télédétection et des modèles Statistiques. Parmi ces modèles, l'on peut citer les modèles CA MARKOV et Land Change Modeler sur IDRISI, CLUE-S, DINAMICA, modèle Automate Cellulaire (SpaCell) et le modèle de réseaux des neurones. Certains modèles sont développés pour simuler et explorer l'occupation actuelle des terres, alors que d'autres s'intéressent aux changements possibles dans le futur. Le modèle CLUE-S est un modèle de simulation des changements d'occupation du sol qui a été utilisé au Bénin. Il a été utilisé par [23] pour modéliser l'occupation du sol respectivement dans le centre du Bénin et dans le bassin versant de l'Alibori. L'utilisation de ce modèle a permis de constater que dans cette région, l'agriculture itinérante sur-brûlis, l'exploitation incontrôlée des forêts et les feux de végétation feront que d'ici l'horizon 2020 toutes les forêts de cette zone d'étude disparaîtront si rien n'est fait.

[24] et [25] ont utilisé le modèle Automate Cellulaire (SpaCell) pour modéliser l'occupation du sol respectivement dans le centre du Bénin et dans le bassin de l'Alibori. L'analyse des projections faites par ces chercheurs avec ce modèle révèle qu'à l'horizon 2020 et 2025, les formations anthropisées (agglomérations, les champs et les jachères) s'étendront au détriment des formations naturelles (forêts galeries, claires, savanes boisées, arborées et arbustives). Par contre [26] a utilisé les réseaux de neurones pour modéliser l'occupation du sol dans les montagnes méditerranéennes (France). Il a travaillé avec une classe particulière de réseaux de neurones, les réseaux multicouches encore appelés perceptrons. Il a par ailleurs comparé les résultats obtenus en tournant ce modèle avec ceux obtenus en tournant les modèles SIG et paramétriques. Au terme de cette étude il a donc constaté une concordance relative des résultats des trois approches. Les taux de prédiction globale des trois méthodes sont très proches: 72.8% (SIG), 74.3% (réseaux neuronaux) et 72.8% (modèle paramétrique).

Quant à [22], il a utilisé le modèle CA MARKOV pour modéliser l'occupation du sol à l'horizon 2031 dans le secteur Natitingou-Boukombé (Nord-Ouest du Bénin). Pour ce faire, en extrapolant les tendances actuelles de l'occupation du sol, il a montré qu'à l'horizon 2031 à travers le scénario Business-As-Usual, le paysage de secteur serait dominé par les mosaïques de cultures et jachères (69,64%). Aussi, l'usage du scénario Croissance Economique Rapide a mis l'accent seulement sur l'accroissement des productions agricoles (73,72%). Pour le scénario Durabilité Environnementale Coordonnée qui intègre la préservation de l'environnement, Il met en évidence un effort de restauration des savanes arborées et arbustives (22,6%). Ceci est similaire au scénario de densification développé par [27] qui encourage la préservation des forêts et limite l'étalement urbain à l'île de la Réunion d'ici 2031. La méthode des scénarios prospectifs spatialisés à l'échelle locale constitue un puissant outil d'aide à la décision pour les gestionnaires de territoires. Les différents scénarios prospectifs conçus tiennent compte des activités socio-économiques développées.

5 CONCLUSION

En somme, de 1986 à 2020, les formations végétales naturelles (forêts denses et zones humides) ont régressé au profit des formations anthropiques (mosaïque culture/jachère et mosaïque sol nu/habitat). La dynamique du couvert entre 1986 et 2020 est donc caractérisée par la reconversion des forêts denses en entités anthropisées. Les différents indicateurs de dégradation du couvert forestier sont la pression agricole, l'exploitation du bois d'œuvre, l'extraction du bois énergie et l'orpaillage clandestin. Les différents acteurs impliqués dans l'exploitation des espaces forestiers sont tous unanimes sur le fait qu'en plus du changement climatique, l'homme est l'un des indicateurs importants responsables de la vulnérabilité des écosystèmes forestiers et de la dégradation des espaces forestiers. L'approche prospective utilisée dans cette étude a permis de comprendre la dynamique actuelle de l'utilisation des terres et de montrer les différentes trajectoires qui risquent de se produire d'ici 2050.

Ainsi, le scénario "Business As Usual" met en évidence la destruction des formations végétales naturelles au profit des formations anthropiques, notamment les mosaïques cultures-jachères et les mosaïques sols nus-habitats d'ici 2050. Le scénario "Coordinated Environmental Sustainability", quant à lui, prévoit une augmentation progressive de la superficie des formations naturelles (forêts denses et dégradées) au détriment des formations anthropiques (cultures/champs et sols nus/établissements). Ce scénario est donc préférable pour la gestion durable des aires forestières. Les différents résultats de ces scénarios peuvent donc servir de référence pour la planification et la gestion durable. Ce scénario inclut donc un effort de préservation de l'écosystème forestier et de restauration des forêts denses humides.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Forum Forestier Africain (AFF) pour le soutien financier et l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) pour le soutien technique à travers le Centre de recherche sur le changement climatique (CRCC) de l'Université de Lomé (Togo). Ils remercient sincèrement toute l'équipe du Professeur Kouami KOKOU, Directeur du Centre de recherche sur les changements climatiques pour leurs contributions considérables à la réalisation de ce travail.

REFERENCES

- [1] FAO, Evaluation des ressources forestières mondiales: Répertoire de données de FRA 2015. Rome, Italie. 253p, 2015.
- [2] Banque Mondiale, Pour que demain ne meure jamais: La Côte d'Ivoire face au changement climatique, juillet 2018, septième édition, 64p., 2018.
- [3] SEP-REDD+ et FAO, Données de base pour la REDD+ en Côte d'Ivoire: Cartographie de la dynamique forestière de 1986 à 2015. Abidjan, Rome, 2017.
- [4] UTCATF, Rapport annuel 2018 - observatoire mondial de l'action climatique non-étatique, 57p., 2018.
- [5] REDD+ CI, stratégie nationale REDD+ de la Côte d'Ivoire, 24p., 2017.
- [6] T. A. OUATTARA, K. F. KOUAME, D.H. N'DA, Y. T. BROU, V. C. JOFACK SOKENG, A. C. HAUHOUOT, J. KOUADIO, K. KOUAME, J. P. RUDANT, «Utilisation des données LiDAR pour la détection des trouées et des zones de déforestation et de dégradation dans la Forêt Classée de Bolo-Est (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) ». *2ème Conférence Internationale GEOFORAFRI*, Abidjan, 26 – 28 Janvier 2016.
- [7] V. C. JOFACK SOKENG, Y. L. AKPA, T. V. ASSOMA, K. F. KOUAME, S. CORGNE, J. P. RUDANT, T. A. OUATTARA, F. M. SORHO, N. YAO, N. P. KOUAME, «Suivi par télédétection des affectations des terres pour la promotion d'une agriculture intégrée au développement forestier en Côte d'Ivoire», *OSFACO 2019*, 13-15 mars 2019, Cotonou, 18p.
- [8] Ministère des Eaux et Forêts, Politique nationale de préservation, de réhabilitation et d'extension des forêts, 24 p., 2018.
- [9] G. CHANDER, B. MARKHAM, D. HELDER, «Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors», *Remote sensing of environment* 113 (5), pp.893-903, 2013.
- [10] G. R. IRIE, G. E. SORO et T. A. GOULA BI, Changements d'états de surface et évolutions spatio-temporelle des précipitations sur le bassin versant de la Marahoué (Côte d'Ivoire), *International Journal of Innovation and Applied Studies* ISSN 2028-9324 Vol.13 N°2 Oct.2015, pp.386-397, 2015.
- [11] S. CHALIFOUX, N. MIROSLAV, C. LAMONTAGNE, R. LATIFOVIC, «Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellite Landsat en hydrologie», *Télédétection*, vol.6, n°1, p.9-17, 2006.
- [12] FAO, 1997, Africover Land Cover Classification: Environment and Natural Resources Service (SDRN). 76p.
- [13] J. L. GUILLAUMET et E. ADJANOHOON, «La végétation de la Côte d'Ivoire». In *Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire*. Paris: ORSTOM, p.161-263, 1971.
- [14] K. KOKOU et A. D. KOKUTSE, «Conservation de la biodiversité dans les forêts sacrées littorales du Togo», *Diversité biologique: Bois et Forêts des Tropiques*, 292, pp.59-70, 2007.
- [15] C. Y. ADOU, «Pratiques paysannes et dynamiques de la biodiversité dans la forêt classée de Monogaga». *Thèse de doctorat unique*, MNHN, Paris, France, 233p., 2005.
- [16] J. L. TROCHAIN, «Accord interafricain sur la définition des types de végétation de l'Afrique». *Bull. Inst. et. Centrofric.*, 13-14, pp.55-93, 1957.
- [17] A. BAKAYOKO, «Influence de la fragmentation forestière sur la composition floristique et la structure végétale dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire». Thèse, Université de Cocody, UFR Biosciences, Abidjan, 258 p., 2005.
- [18] J. R. EASTMAN Ronald, Idrisi Taiga, Guide to GIS and Image Processing: Manual version, 16.02, Clark University, 210.p., 2009.
- [19] K. ANOUMOU, «Potentialités des données de télédétection optique et radar libres d'accès pour l'évaluation et le suivi des écosystèmes forestiers tropicaux: étude de cas au Togo, en République Démocratique du Congo, en Guyane française et en République Dominicaine». *Thèse de Doctorat*, Université Paris Est, 258p., 2018.
- [20] M. BOULOGNE, «Vulnérabilité des paysages forestiers dans le parc de Ranomafana (Madagascar): dynamiques environnementales et trajectoires agroforestières». *Thèse de Doctorat de Géographie*. Université Grenoble Alpes, 270p., 2016.
- [21] B. G. F. BOUSSOUGOU, «Vulnérabilité des paysages forestiers en relation avec les activités humaines et la variabilité climatique en Tanzanie: Analyse prospective des dynamiques de l'occupation du sol des réserves forestières de Pugu et de Kazimzumbwi». *Thèse de Doctorat de Géographie*. Université de La Réunion. 212p., 2017.
- [22] B. T. AGBANOU, «Dynamique de l'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé (Nord-Ouest Bénin): de l'analyse diachronique à une modélisation prospective». *Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse*. 271p, 2018.
- [23] V. OREKAN, «Implémentation du modèle CLUE-s aux transformations spatiales dans le Centre Bénin aux moyens de données socio-économiques et de télédétection». *Thèse de Doctorat de l'Université de Bonn*. Allemagne, 230p.
- [24] J. OLOUKOI, V. J. MAMA et F., «Modélisation de la dynamique de l'occupation des terres dans le département des collines au Bénin». *Télédétection*, 2006, vol. 6, n°4, pp.305-323, 2006.
- [25] D. ABDOULAYE, «Dynamique de l'occupation des terres et ses incidences sur l'écoulement dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou (Nord-Bénin) ». *Doctorat Unique Université d'Abomey-Calavi*, 270p., 2015.
- [26] M. PAEGELOW, «Géomatique et géographie de l'environnement: De l'analyse spatiale à la modélisation prospective». *Habilitation à diriger des recherches*. Tome I, Toulouse (France), 211p., 2004.
- [27] G. LAJOIE G. et A. HAGEN-ZANKER A., «La simulation de l'étalement urbain à la Réunion. Apport de l'automate cellulaire pour la prospective territoriale». *Cybergeo: European Journal of Geography* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques. 15 p., 2007.