

Evaluation à long terme de l'impact de la dynamique de l'occupation des sols sur les écoulements dans le bassin versant du Haut Bandama (Nord Côte d'Ivoire)

[Long-term evaluation of the impact of land use dynamics on runoff in the Haut Bandama watershed (Northern Ivory Coast)]

Ouede Gla Blaise¹, Kouadio Zilé Alex¹, Yao Affoué Berthe¹, Kouassi Kouakou Lazare¹, and Diedihou Arona²

¹Geoscience et environnement, Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire

²Institut de Recherche et de Développement (IRD), Abidjan, Côte d'Ivoire

Copyright © 2023 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: Land use changes are mainly driven by human activities and climate change. Uncontrolled land use can alter surface runoff and affect several sectors of activity such as agriculture, hydropower, drinking water supply, sanitation, etc. The main objective of this study is to assess the influence of changes in land surface conditions on runoff in the Haut Bandama catchment. For this purpose, LANDSAT satellite images from 1990, 2006 and 2020 were used. These images were processed by the maximum likelihood supervised classification method under ENVI to establish the land use maps. Based on the past land use trends, a future prediction (2035 and 2050) is made using the Land Change Modeler. The diachronic analysis of the land use maps for the period 1990-2020 showed a decline in the area of forest and savannah patches, followed by that of water bodies. Conversely, the area of built-up and bare land as well as crops and fallow land is increasing. The same dynamics are predicted for the 2035 and 2050 horizons, where the savannah class dominates most of the net changes. The dynamics of the land surface condition has led to an increase in the runoff coefficient from 1990 to 2020 from 18.5% to 30.7% respectively. This evolution continues until 2050 with 34.5% in 2035 and 36.4% in 2050.

KEYWORDS: Land use, runoff, LCM, Upper Bandama catchment, Ivory Coast.

RESUME: Les changements d'occupation des sols ont pour principaux facteurs les activités anthropiques et le changement climatique. La non maîtrise du mode d'occupation des sols peut modifier les écoulements de surface et affecter plusieurs secteurs d'activité tels que l'agriculture, l'hydroélectricité, l'approvisionnement en eau potable, l'assainissement, etc. Cette étude a pour objectif principal d'évaluer l'influence des mutations de l'état de surface du sol sur le ruissellement du bassin versant du Haut Bandama. Pour ce faire, des images satellitaires LANDSAT de 1990, 2006 et 2020 ont été utilisées. Ces images ont été traitées par la méthode de classification supervisée du maximum de vraisemblance sous ENVI pour établir les cartes d'occupation du sol. Sur la base des tendances d'occupation des sols passées, une prédiction future (2035 et 2050) est faite à l'aide du modèle Land Change Modeler. L'analyse diachronique des cartes d'occupation des sols de la période 1990-2020 a permis d'observer une régression de la superficie des lambeaux de forêts et de savanes, suivie de celle des plans d'eau. A l'inverse, la superficie des bâtis et sols nus ainsi que des cultures et jachères sont en augmentation. Cette même dynamique est prédite aux horizons 2035 et 2050 où la classe de savane est prépondérante dans la plupart des changements nets. La dynamique de l'état de surface des sols a entraîné une augmentation du coefficient de ruissellement de 1990 à 2020 qui passe de 18,5% à 30,7% respectivement. Cette évolution se poursuit jusqu'à l'horizon 2050 avec 34,5% en 2035 et 36,4% en 2050.

MOTS-CLEFS: Occupation des sols, ruissellement, LCM, bassin versant du haut Bandama, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

Le constat est le même partout, les ressources naturelles que disposent la terre sont de plus en plus menacées par les changements climatiques et les pressions humaines. Les aires protégées, qui regorgent la plupart du temps d'importantes valeurs naturelles et culturelles, subissent d'énormes pressions anthropiques qui dégradent leur intégrité [1].

Bien qu'il existe des facteurs naturels favorisant la dynamique des milieux comme les variations du couvert végétal l'homme à travers ses différentes activités en est depuis un certain moment le principal déclencheur de la transformation dont font actuellement objet les écosystèmes [2].

L'Afrique subsaharienne, particulièrement la Côte d'Ivoire doit en grande partie son économie à l'agriculture. Pour subvenir à leurs besoins croissants, les populations rurales, pauvres dans leur majorité, n'ont d'autres choix que d'étendre leurs zones de culture au détriment des zones boisées qui ont un rôle multiple. A savoir l'atténuation du changement climatique par la séquestration du carbone, la protection des sols contre les facteurs de l'érosion éolienne et hydrique, la conservation des habitats naturels et bien d'autres services écosystémiques [3]. Cette pression va encore augmenter avec la forte croissance démographique, la nécessaire croissance de la production agroalimentaire, le développement industriel et l'amélioration des conditions de vie des populations [4]. Au Nord de la Côte d'Ivoire, précisément dans le bassin versant du Haut Bandama, la Sucrerie d'Afrique-Côte d'Ivoire (SUCAF-CI) et la coopérative des planteurs de canne à sucre villageoise de Ferkessedougou veulent étendre leurs superficies agricoles pour juguler l'insatisfaction de la demande nationale en sucre. La culture de la canne à sucre est l'une des principales activités des populations du bassin versant du Haut Bandama. Pour un bon développement, les cultures en général et particulièrement la canne à sucre ont fortement besoin d'eau et de température optimale [5] dont les fluctuations sont tributaires de la dynamique des milieux [6]. Ainsi, l'étude de la dynamique de l'occupation des sols et de son impact sur les écoulements à travers l'analyse diachronique multi-dates des cartes d'occupation du sol et de l'évolution des coefficients de ruissellement s'avère de plus en plus indispensable, à la fois pour la connaissance d'un territoire et pour son aménagement [7]. Cette étude a pour objectif d'analyser les mutations de l'état de surface du sol et d'évaluer son influence sur la réponse hydrologique du bassin versant du Haut Bandama à long terme.

2 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude est un sous bassin du fleuve Bandama dénommé bassin versant du Haut Bandama avec pour exutoire la station hydrométrique de la route Korhogo-Badikaha. Le bassin versant du Haut Bandama est situé entre les longitudes 5°00' et 6°16'Ouest et les latitudes 9°09' et 10°15' Nord (Figure 1). Il s'étend sur les régions du Poro, du Tchologo et une partie de la Bagoué avec une superficie estimée à 9 688 km² et représente environ 10% du bassin versant entier du Bandama. Les principales activités menées dans cette partie de la Côte d'Ivoire sont l'agriculture (canne à sucre, maraîchers etc.), l'exploitation minière (mine d'or de Tongon etc.) et la pêche.

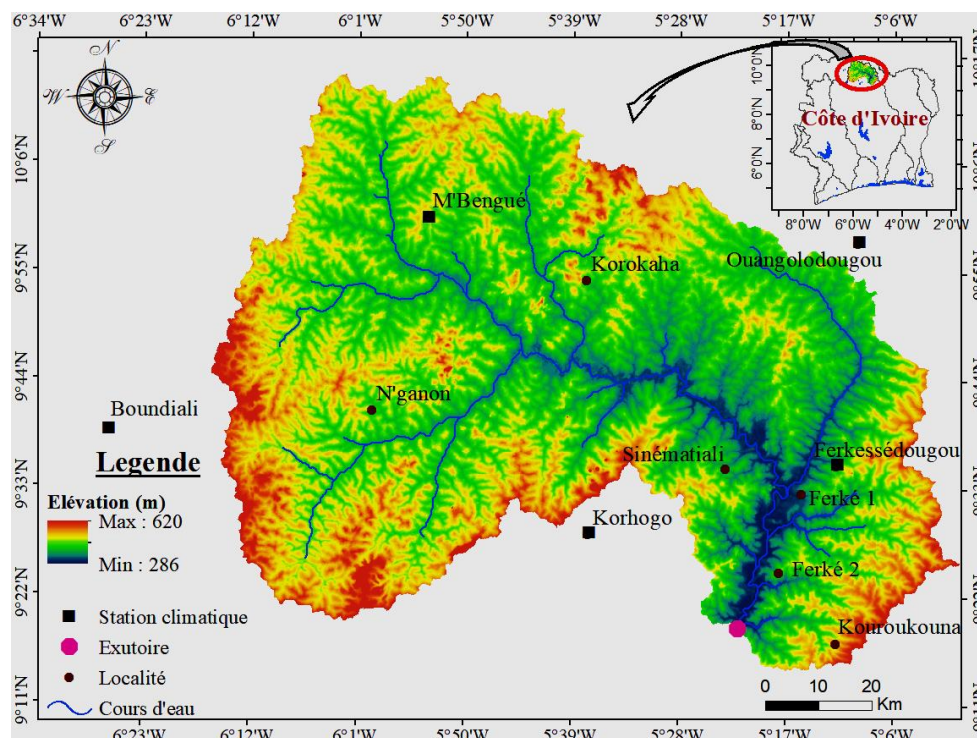


Fig. 1. Bassin versant du Bandama blanc

Le bassin versant du Haut Bandama est sous l'influence du régime tropical de transition caractérisé par deux saisons [8]: une saison des pluies d'avril à octobre avec des précipitations moyennes mensuelles variant entre 127,6 et 248 mm, une saison sèche de novembre à mars avec des pluies moyennes mensuelles variant entre 1,9 et 49 mm. Les températures moyennes mensuelles varient entre 25°C en Août et 29°C en Avril (Figure 2). Le bassin versant abrite des complexes sucriers appartenant à l'entreprise Agroalimentaire SUCAF-CI créés en 1997 à la suite du programme de restructuration et de privatisation du secteur sucrier ivoirien. La SUCAF-CI est composée de deux sucreries (Ferké 1 et Ferké 2) situées à 40 km l'une de l'autre. La production du sucre de canne provient aussi bien des plantations industrielles (12 000 ha) que des plantations villageoises (2 500 ha).

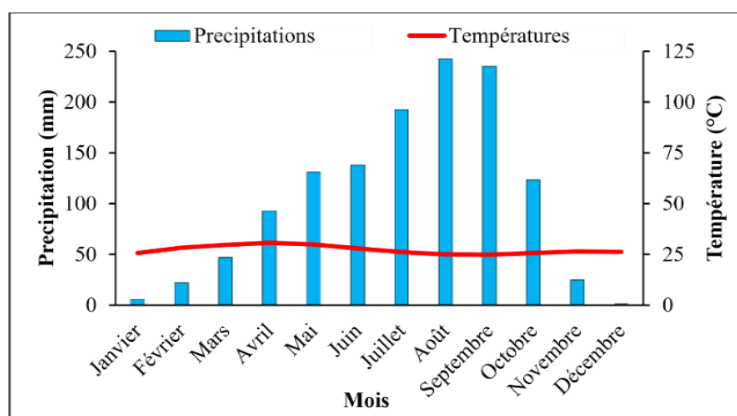


Fig. 2. Diagramme ombrothermique sur la période 1986-2016

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 MATÉRIEL

Le matériel utilisé est constitué d'un GPS (*Global Positioning System*), pour enregistrer les coordonnées géographiques; un appareil photo numérique pour les prises de vues sur le terrain. Les logiciels utilisés sont: ENVI (*Environment for Visualizing*

Images) pour le traitement numérique des images satellitaires, Land Change Modeler pour les prédictions et les applications SIG (Systèmes d'Information Géographique) et ArcGis pour les réalisations cartographiques.

Les données utilisées concernent les images Landsat TM, ETM+ et OLI TIR de résolution spatiale 30 m respectivement des années 1990, 2006 et de 2020 pour la cartographie (tableau 1) et la quantification de la dynamique de l'occupation des sols. Ces images sont téléchargées sur le site internet Earthexplorer (<http://earthexplorer.usgs.gov>). Un modèle numérique de terrain (MNT) a été également téléchargé sur ce site pour la détermination des variables explicatives.

Tableau 1. Caractéristiques des images satellitaires utilisées

Capteur	Résolution	Bandes spectrales	Longueur d'onde
Landsat ETM Landsat ETM+ Landsat 8 OLI+	30	2- Vert (visible)	0,52 - 0,60
	30	3- Rouge (visible)	0,63 - 0,69
	30	4- Infrarouge proche	0,76 - 0,90
	30	5- Infrarouge moyen 1	1,55 - 1,75
	30	6- Infrarouge moyen 2	1,566 - 1,651

3.2 MÉTHODES

3.2.1 DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES SOLS SUR LA PÉRIODE 1990-2020

- **Prétraitement**

Le mosaïquage s'est avéré nécessaire étant donné que la zone d'étude est couverte par 3 scènes d'images Landsat (197-053, 197-054 et 198-053 correspondant à la même période). Il a consisté à juxtaposer les bandes identiques des scènes entre elles pour former une plus grande. Les images ont d'abord été rehaussées dans le but d'uniformiser les teintes des bandes spectrales [9]. Le secteur d'étude est extrait à partir des images mosaïquées.

- **Traitement**

Des compositions colorées ont été réalisées en combinant les bandes 4-3-2 des images Landsat TM et 6-5-4 pour les ETM+ et OLI TIRS. L'objectif est d'avoir une synthèse d'informations pour une bonne discrimination des unités d'occupation des sols [10]. De plus, l'interprétation visuelle des images permettra d'établir la relation entre le terrain et l'image dans l'identification des différentes classes sur les images. La connaissance du secteur d'étude a guidé le choix de la méthode de classification en faveur de la classification supervisée.

- **Classification supervisée**

Dans la méthode de classification supervisée, les parcelles d'entraînement sont définies par les RDI (Régions D'Intérêts). Les RDI sont des portions d'images sélectionnées par l'utilisateur. Chaque RDI représente une catégorie thématique qui peut comprendre un ou plusieurs échantillons. Ces derniers sont les clés d'interprétation des images. Ils sont déterminés sur la base des données d'observation, des données auxiliaires et des connaissances de l'analyseur pour la zone d'étude. Les étapes de la démarche de classification de l'occupation des sols sont détaillées à la figure 3.

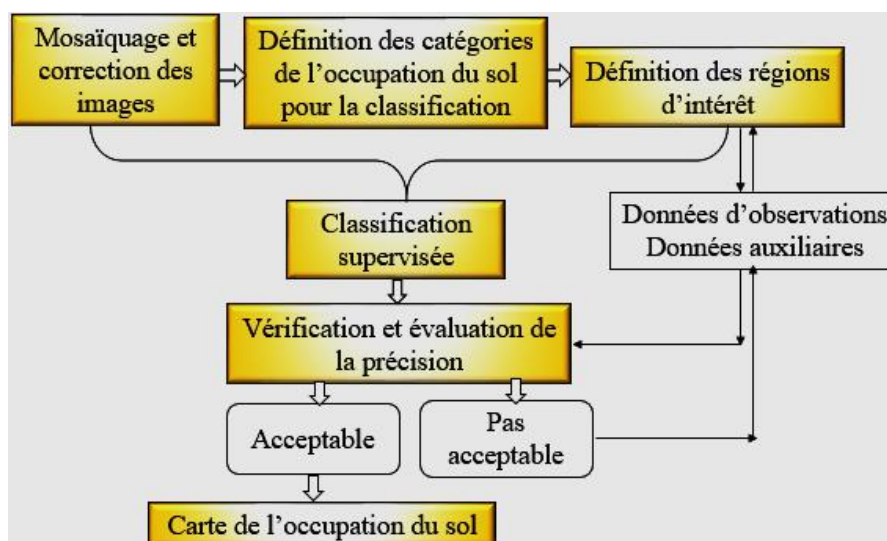


Fig. 3. Organigramme de la méthode de classification de l'occupation des sols

- **Calcul du taux d'évolution**

La dynamique de chaque catégorie d'occupation des sols sera appréciée en calculant le taux d'évolution $E_{(i,k)}$ des superficies d'occupation des terres. Soit S_i la superficie d'une catégorie d'occupation des terres de l'année i et S_k , celle d'une catégorie d'occupation des terres de l'année k , avec $k > i$ et $E_{(i,k)}$ se calcule selon l'équation 1:

$$E_{(i,k)} = \frac{S_k - S_i}{S_i} \times 100 \quad \rightarrow (1)$$

Si $E_{(i,k)} = 0$, on conclut qu'il y a stabilité de cette catégorie d'occupation des terres;

Si $E_{(i,k)} < 0$, on conclut qu'il y a régression de cette catégorie;

Si $E_{(i,k)} > 0$, il y a extension ou évolution de cette catégorie.

La tendance spatiale de l'occupation des terres est évaluée avec l'outil de tendance spatiale de Land Change Modeler. Elle consiste à cartographier la conversion d'une ou plusieurs classes à une autre (à travers les indices de transition) suivant une fonction polynomiale. Land Change Modeler utilise une fonction polynomiale du troisième degré pour cartographier les indices de transition de chaque classe [11].

- **Validation des résultats de la classification de l'occupation des sols**

La validation des cartes réalisées est effectuée par comparaison des résultats classifiés de l'occupation des sols avec les données de références (observations de terrain) et également par une analyse des précisions. Le résultat de la classification est considéré comme acceptable si le pourcentage du nombre total de pixels correctement classifiés est supérieur à 85%. De même le coefficient Kappa doit être supérieur à 0,80 [12].

- **Modélisation prédictive de l'occupation des terres aux horizons 2035 et 2050**

Le changement de l'occupation des sols est un résultat de l'interaction complexe entre les facteurs physiques et humains [13] et [14]. Les changements historiques sont d'abord déterminés à partir d'une série multi-temporelle de cartes de l'occupation des sols (carte de 1990 et 2006). Puis, les facteurs les plus significatifs appelés variables explicatives (tableau II) dans ces changements sont déterminés. Ces changements historiques et les sources d'informations décrivant les variables explicatives sont intégrés pour modéliser l'évolution de l'occupation des sols avec la régression logistique (ReLog) ou le Perceptron Multi-Couche (PMC). La troisième étape consiste à appliquer la chaîne de Markov afin de produire une prédiction à court, moyen et long terme de l'occupation des sols du bassin versant du Haut Bandama. La dernière étape consiste à valider le modèle en comparant la carte prédictive (carte simulée 2020) à celle réelle (carte observée 2020) pour la même date. Les

étapes de la modélisation prédictive de l'occupation des sols à l'aide du module LCM sont donc structurées selon la figure 4 ci-dessous.

Tableau 2. Variables explicatives pour la modélisation prédictive

	Type de données	Description et source
Cartes historiques	Cartes d'occupation des sols de 1990, 2006 et 2020	Réalisées à partir des images Landsat de 1990, 2006 et 2020
Variables explicatives	Carte de distance aux cours d'eau	Définie à partir du réseau hydrographique
	Carte de distance au réseau routier	Définie à partir du réseau routier
	Carte de distance aux localités	Définie à partir des zones urbanisées
	Carte du relief	A partir du MNT
	Carte de pente	A partir du MNT

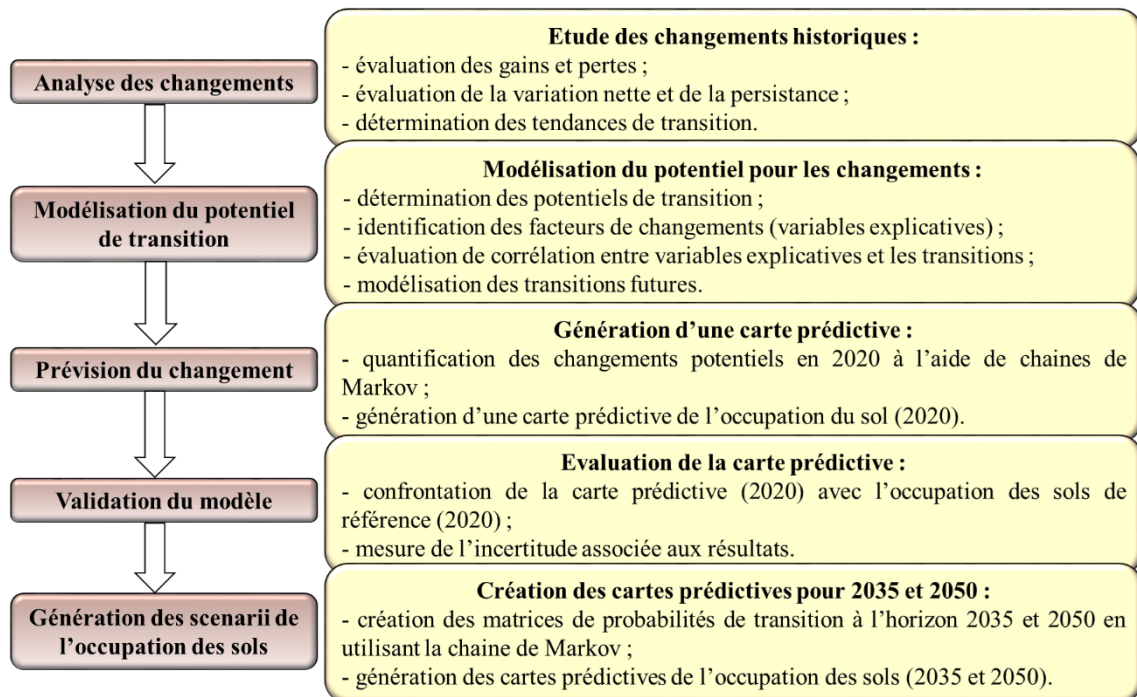


Fig. 4. Etapes de la prédiction de l'occupation des sols à l'aide de LCM [15]

3.2.2 ÉVALUATION DE L'IMPACT DE LA DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE DE L'OCCUPATION DES SOLS SUR LES ÉCOULEMENTS

L'impact de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation des sols a été appréhendé à travers l'évolution du coefficient de ruissellement. Le coefficient de ruissellement représente le rapport de la fraction d'eau de la pluie ruisselée par rapport à l'eau précipitée. Il est fonction de l'état de surface et de l'importance des précipitations. Les coefficients de ruissellement (K_{ri}) établis par les auteurs tels que [16], [17] and [18] sur des bassins versants expérimentaux en fonction des catégories d'occupation des sols sont utilisés. Ensuite, à chaque état de surface, un coefficient de ruissellement est attribué tenant compte de la connaissance approfondie de la zone d'étude. Le coefficient de ruissellement moyen annuel du bassin versant du Haut Bandama est ensuite déterminé par pondération des surfaces des classes d'occupation des sols à partir de l'équation 2:

$$K_r = \frac{\sum K_{ri} A_i}{\sum A_i} \rightarrow (2)$$

Avec:

K_{ri} : coefficient de ruissellement de l'état de surface i

A_i : Superficie occupée par la classe d'occupation du sol i dans le bassin versant

K_r : Coefficient de ruissellement moyen annuel du bassin versant

4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 RÉSULTATS

4.1.1 VALIDATION DES RÉSULTATS DE LA CLASSIFICATION DE L'OCCUPATION DES SOLS

La matrice de confusion pour l'évaluation de la classification de l'occupation des sols de 1990 montre qu'au total 1 197 pixels de l'image sont évalués (tableau III). Parmi ces pixels, 1 148 pixels de la carte de 1990 sont en accord avec ceux de l'image de référence, soit une précision globale d'environ 95,9 %.

Tableau 3. Matrice de confusion pour la classification de l'occupation des sols de 1990

1990		Données de référence						Précision (%)	
		Lambeau de forêt	Savane	Culture ou jachère	Bâti ou sol nu	Zone humide	Plan d'eau		Total
Données classifiées	Lambeau de forêt	132	0	1	0	10	0	143	92,3
	Savane	0	175	0	4	1	4	184	95,11
	Culture ou jachère	17	0	59	0	0	0	76	77,63
	Bâti ou sol nu	0	0	0	119	0	0	119	100
	Zone humide	0	0	0	0	216	11	227	95,15
	Plan d'eau	0	0	0	0	11	447	458	97,59
	Total	149	175	60	123	228	462	1 197	

En ce qui concerne la classification de l'occupation des sols de 2006, un ensemble de 1 484 pixels a été testé pour évaluer sa précision dont 1 471 pixels sont bien classifiés soit une précision globale de 99,12 % (Tableau IV).

Tableau 4. Matrice de confusion pour la classification de l'occupation des sols de 2006

2006		Données de référence						Précision (%)	
		Lambeau de forêt	Savane	Culture ou jachère	Bâti ou sol nu	Zone humide	Plan d'eau		Total
Données classifiées	Lambeau de forêt	227	0	0	0	0	3	230	98,6
	Savane	0	244	0	0	0	0	244	100
	Culture ou jachère	0	0	213	0	0	0	213	100
	Bâti ou sol nu	0	0	0	286	0	0	286	100
	Zone humide	0	0	0	0	177	9	186	95,16
	Plan d'eau	0	0	0	0	1	324	325	99,69
	Total	227	244	213	286	178	336	1 484	

La matrice de confusion et la précision individuelle des catégories d'occupation des sols de 2020 sont consignées dans le tableau V. Dans ce tableau, 1 466 pixels classifiés sont comparés avec ceux de l'image de référence. Parmi eux, 1 436 pixels soit environ 97,95 % des pixels sont en bon accord.

Tableau 5. Matrice de confusion pour la classification de l'occupation des sols de 2020

2020		Données de référence						Précision (%)	
		Lambeau de forêt	Savane	Culture ou jachère	Bâti ou sol nu	Zone humide	Plan d'eau		Total
Données classifiées	Lambeau de forêt	303	0	0	0	0	1	304	99,67
	Savane	2	225	0	14	0	1	242	92,97
	Culture ou jachère	0	0	263	0	0	0	263	100
	Bâti ou sol nu	0	0	0	329	0	1	330	99,69
	Zone humide	0	0	0	2	97	3	102	95,09
	Plan d'eau	0	0	0	0	6	219	225	97,33
	Total	305	225	263	345	103	225	1 466	

Le tableau VI présente les précisions globales et les coefficients Kappa obtenus à partir des résultats d'analyse des matrices de confusion. Les précisions globales et les coefficients de Kappa des cartes réalisées sont supérieurs à la valeur recommandée (de 85% et 0,80 respectivement) qui sont dans l'ordre de 0,94 à 0,98. Les précisions obtenues permettent de dresser les cartes de l'occupation des sols pour les années 1990, 2006 et 2020 (respectivement figure 5, Figure 6 figure 7).

Tableau 6. Précision globale des cartes de l'occupation des sols

Occupation du sol	1990	2006	2020
Précision globale (%)	95,90	99,12	97,95
Coefficient Kappa	0,95	0,99	0,98

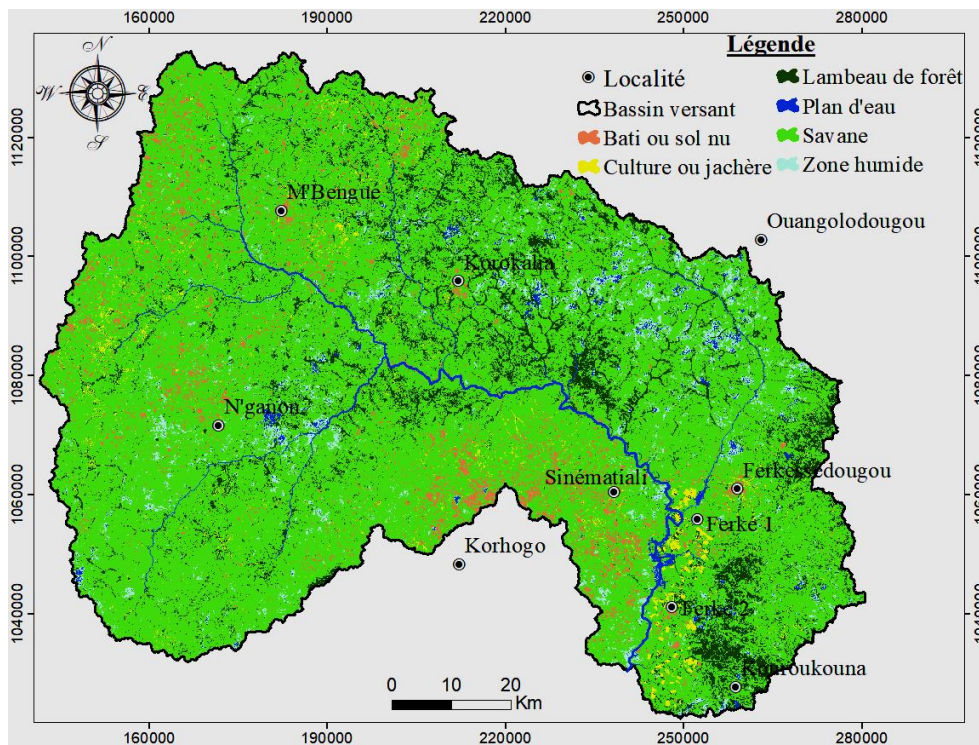


Fig. 5. Cartes de l'occupation des sols du bassin versant du Haut Bandama de 1990

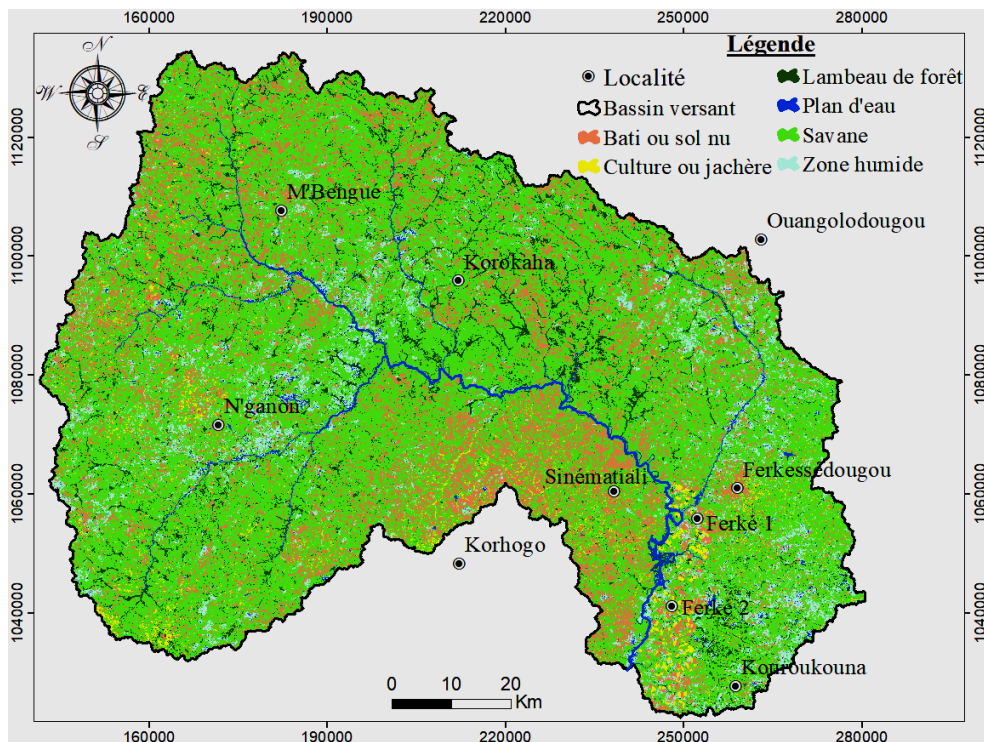


Fig. 6. Cartes de l'occupation des sols du bassin versant du Haut Bandama de 2006

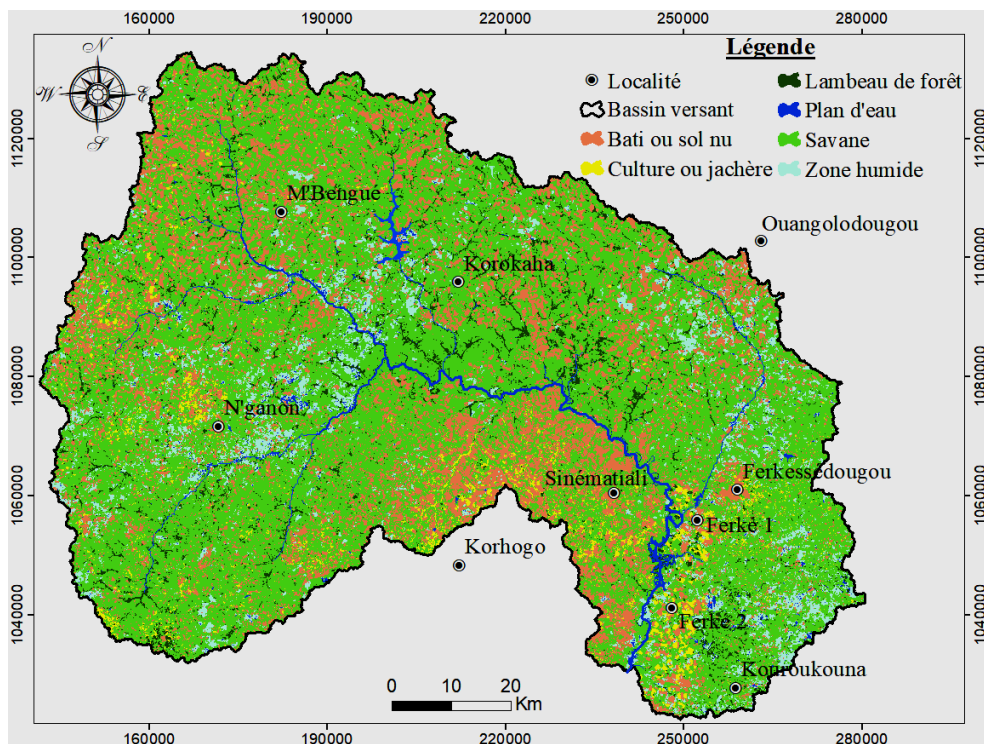


Fig. 7. Cartes de l'occupation des sols du bassin versant du Haut Bandama de 2020

4.1.2 ANALYSE DIACHRONIQUE DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES SOLS

• Dynamique de l'occupation des sols de la période 1990-2006

Les pourcentages de changement observés entre 1990 et 2006 montrent que les classes de culture ou jachère, des zones humides et des bâtis ou sol nu, présentent une importante progression (Tableau VII). Les autres changements sont relativement importants tels que la diminution des surfaces des lambeaux de forêt (-48,89 %), des savanes (-14,88 %) et des plans d'eau (-4,80 %).

Tableau 7. Changement de l'occupation du sol entre 1990-2006

	1990	2006	Gain et perte (km ²)	Gain et perte (km ²) (%)
Lambeau de forêt	1034,08	528,48	-505,6	-48,89
Savane	7722,91	6573,29	-1149,62	-14,88
Culture ou jachère	155,92	203,38	47,46	30,44
Bâti ou sol nu	332,56	1662,91	1330,35	400,03
Zone humide	338,43	619,66	281,23	83,10
Plan d'eau	104,95	99,91	-5,04	-4,80

• Dynamique de l'occupation des sols sur la période 2006-2020

La période 2006-2020 est marquée par une stabilité des zones humides et les plans d'eau (figure 5). Cependant, le tableau VIII montre que les terres cultivées ou en jachères et les zones bâtis ou sols nus présentent de légères progressions, avec la totalité de changements respectifs de 34,32 % et de 22,43 %. L'occupation du sol pendant cette période enregistre une diminution des classes des zones humides (-0,57 %), des savanes (-3,65 %), des plans d'eau (-11,65 %) et en particulier de la classe des lambeaux de forêt (-35,5 %).

Tableau 8. Changement de l'occupation des sols entre 2006-2020

	2006	2020	Gain et perte (km ²)	Gain et perte (km ²) (%)
Lambeau de forêt	528,48	340,85	-187,63	-35,5
Savane	6573,29	6333,31	-239,98	-3,65
Culture ou jachère	203,38	273,19	69,81	34,32
Bâti ou sol nu	1662,91	2035,89	372,98	22,43
Zone humide	619,66	616,14	-3,52	-0,57
Plan d'eau	99,91	88,26	-11,65	-11,66

• Bilan de la dynamique de l'occupation des sols dans le bassin versant du Haut Bandama

La figure 8 résumant respectivement des superficies, les gains et pertes et les taux d'évolution des superficies des classes sur les périodes 1990-2006 et 2006-2020. On peut observer que sur les deux périodes considérées, la surface des lambeaux de forêt présente une diminution d'environ 48,89 % et 35,5 % respectivement sur les périodes 1990-2006 et 2006-2020. Durant ces deux périodes, la catégorie qui a progressé le plus est celle des bâtis ou sols nus, surtout sur la période 1990-2006 avec un gain de plus de 1 300 Km² par rapport à sa superficie initiale.

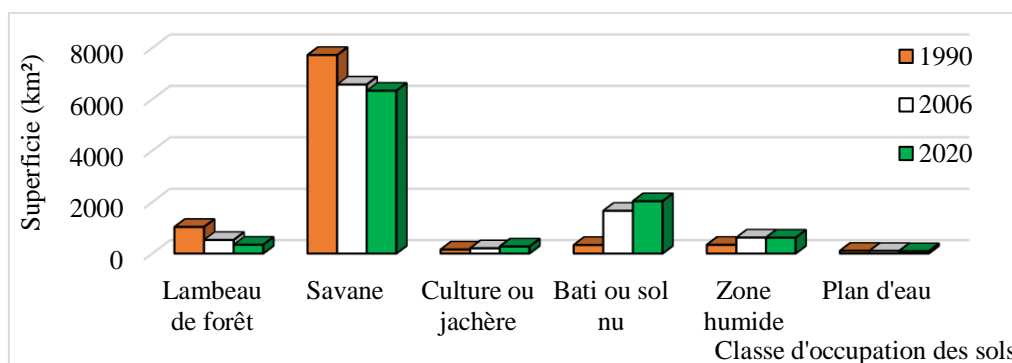


Fig. 8. Dynamique de l'occupation des sols bassin versant du Haut Bandama de 1990 à 2020

4.1.3 OCCUPATION DES SOLS DU BASSIN VERSANT DU HAUT BANDAMA SUR LA PÉRIODE 2020-2050

4.1.3.1 ANALYSE DU CHANGEMENT DE L'OCCUPATION DES SOLS À L'AIDE DU MODÈLE LCM

Les figures 9 et 10 présentent respectivement les changements globaux et nets de l'occupation des sols sur la période 1990-2006. Elles montrent que la plupart des catégories ont des gains et des pertes: les zones de lambeaux de forêt et de savanes ont nettement régressé tandis que les zones de bâtis ou sols nus, les zones de cultures ou jachères et les zones humides ont nettement progressé. La superficie des plans d'eau ne semble pas évoluer. Ces graphiques montrent que le modèle LCM traduit bien la dynamique observée sur la période 1990-2006.

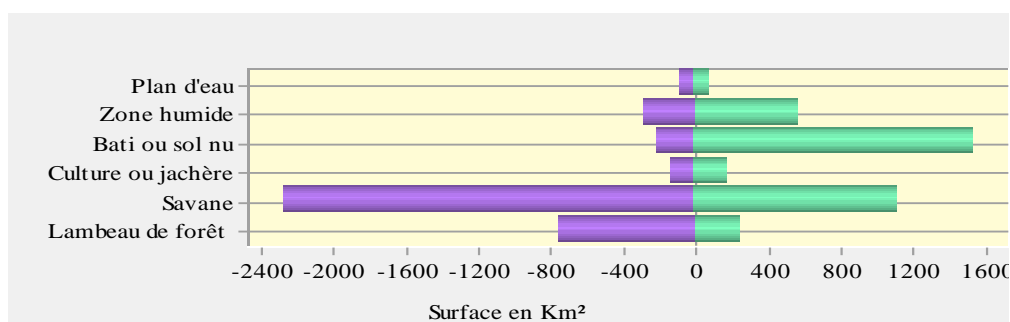


Fig. 9. Gains et pertes en Km² de l'occupation des sols entre 1990 et 2006

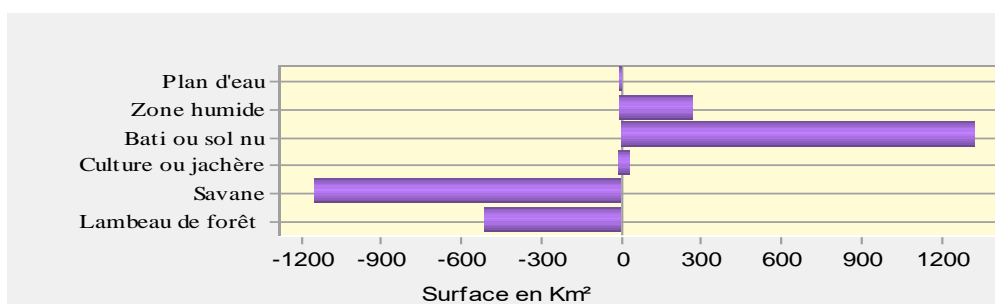


Fig. 10. Changement net de l'occupation des sols entre 1990 et 2006

La classe de savane présente la plus forte contribution dans la plupart des changements nets des catégories d'occupation des sols, suivi des bâtis ou sols nus (Figure 11). Toutefois, il existe des transitions potentielles des lambeaux de forêt vers les savanes. On note des transitions potentielles sur le bassin entre la classe des bâtis et sols nus et la classes de savanes. La classe des bâtis et sols nus augmentent de superficie au détriment de la classe des savanes. Également, les cultures et jachères perdent leur superficie au profit des savanes tandis que les plans d'eau régressent au profit des bâtis et sols nus. Au niveau des

classes des bâtis et sols nus, on assiste à une perte des surfaces au profit des classes de savane. De même les zones humides régressent au profit des classes de savane.

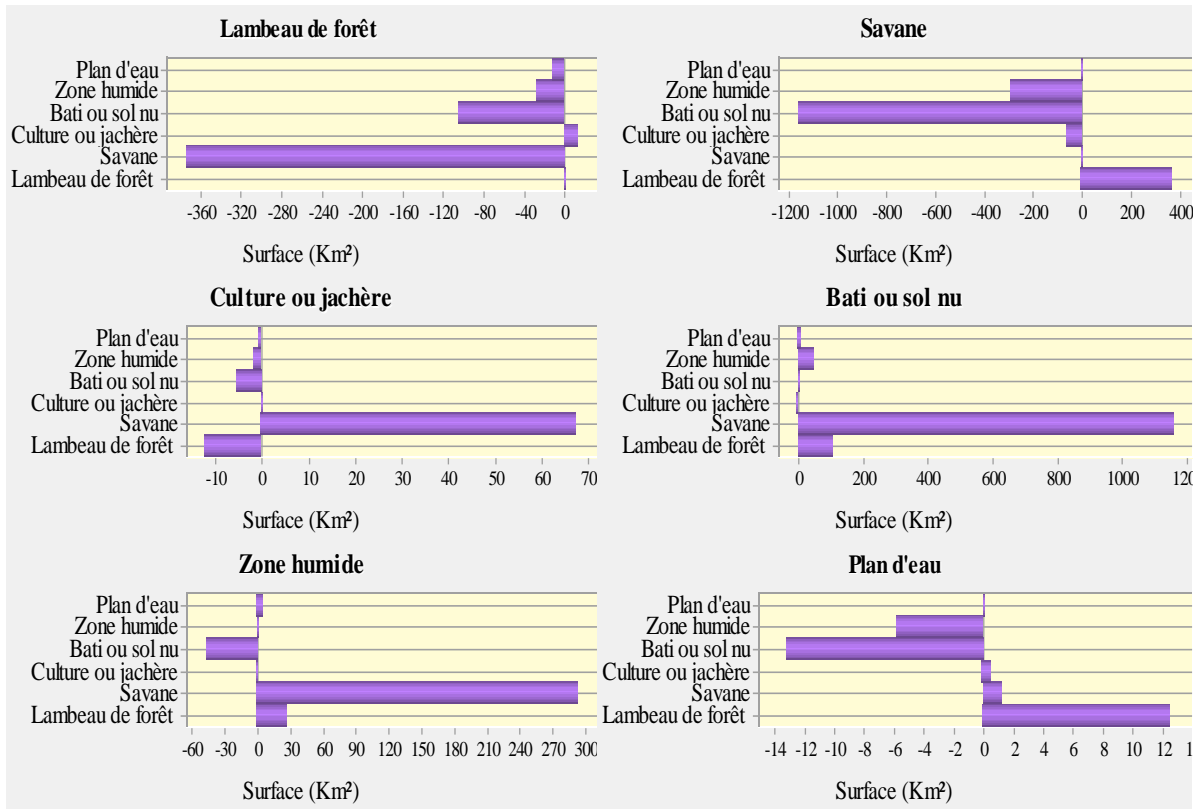


Fig. 11. Contributions du changement net des catégories de l'occupation des sols de 1990 à 2006

Les figures 12, 13 et 14 présentent la cartographie de la tendance des indices de transitions des catégories de l'occupation des sols entre 1990 et 2006. Dans ces figures, la couleur rouge foncé indique les plus fortes transitions des catégories. A l'inverse, la couleur vert foncé montre qu'aucun changement n'a eu lieu. Les transitions des bâtis et sols nus (Figure 12) sont très importantes dans la partie Nord-Ouest et Ouest du bassin versant et tend vers les localités de M'bengué et N'ganon pour arriver dans zone de Sinématiali et Korhogo (avec Les indices 0,014 à 0,044). Cette transition se ressent mais faiblement dans la zone du complexe sucrier de Ferkessedougou. Au niveau de la catégorie des classes de culture ou jachère (Figure 13) les transitions ont lieu à l'extrême Ouest et le Nord-Ouest du bassin versant passant par M'bengué avec moins d'intensité. Cependant au Sud du bassin dans la zone du complexe sucrier de Ferké 1 et 2, la tendance générale de transition des cultures ou jachères montre de forts changements avec des indices compris entre 0,017 et 0,030.

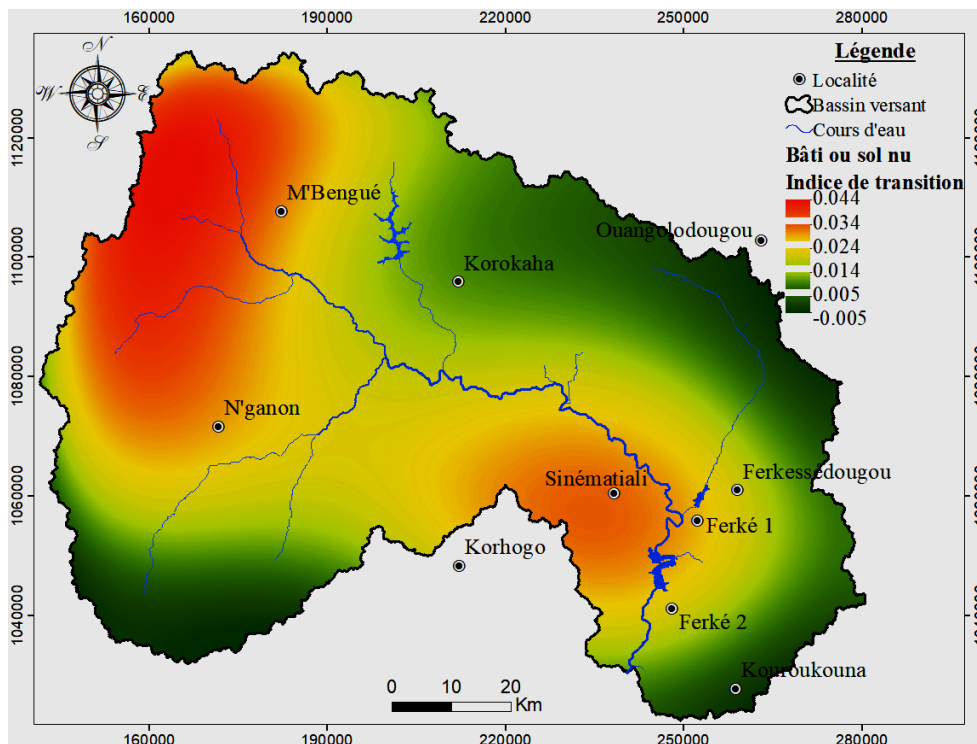


Fig. 12. Tendence du changement global des bâtis ou sols nus sur la période 1990-2006

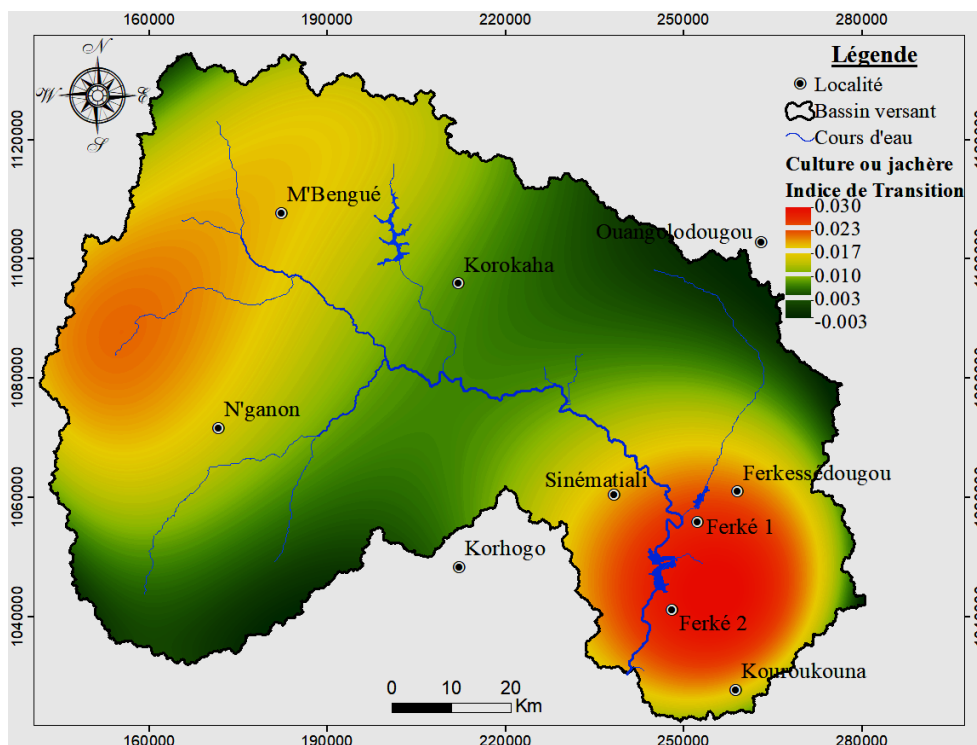


Fig. 13. Tendence du changement global des cultures ou jachères sur la période 1990-2006

Les transitions générales des lambeaux de forêt (Figure 14) ont lieu dans le Nord, dans l'Est et Sud-Est du bassin versant. Les indices de transition y sont dans l'ordre de 0,044 à 0,149. La figure 15 montre la transition globale de la classe des plans d'eau au Nord dans les localités de Korokaha et Ouangolodougou avec des indices (compris entre 0,015 et 0,149) inférieurs à ceux des lambeaux de forêt.

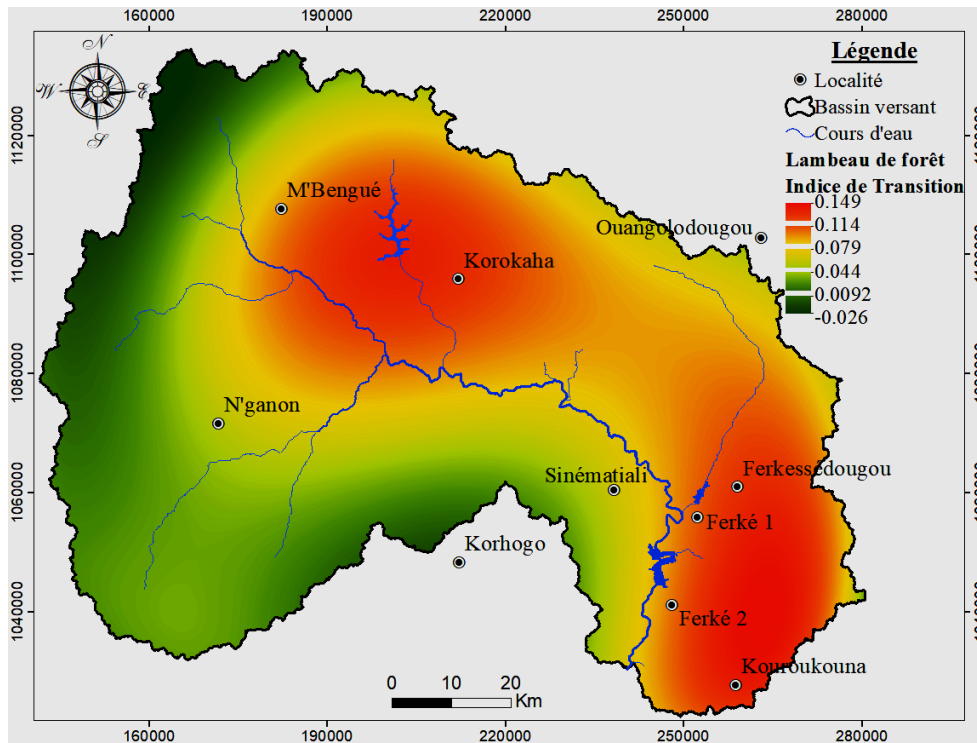


Fig. 14. Tendence du changement global des lambeaux de forêt sur la période 1990-2006

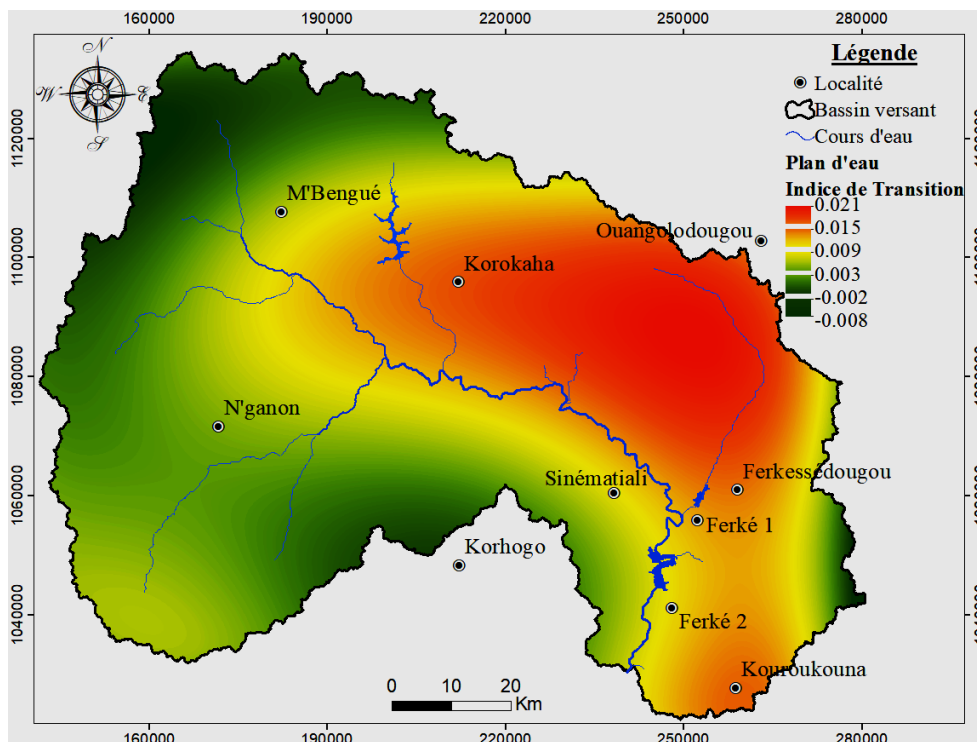


Fig. 15. Tendence du changement global des plans d'eau sur la période 1990-2006

A la figure 16, les indices de transition des savanes montrent que la plus forte transition de la classe des savanes a lieu dans l'Ouest du bassin. Cette transition est observée également au Sud-Est, touchant le complexe sucrier de Ferké 1 et 2 (avec des indices allant de 0,210 à 0,297). La figure 17 montre que les transitions des zones humides sont élevées au Nord-est du bassin versant. Mais également au centre Ouest, au Sud-Ouest et au Sud-Est du bassin versant avec des indices de transition faible allant de 0,010 à 0,059.

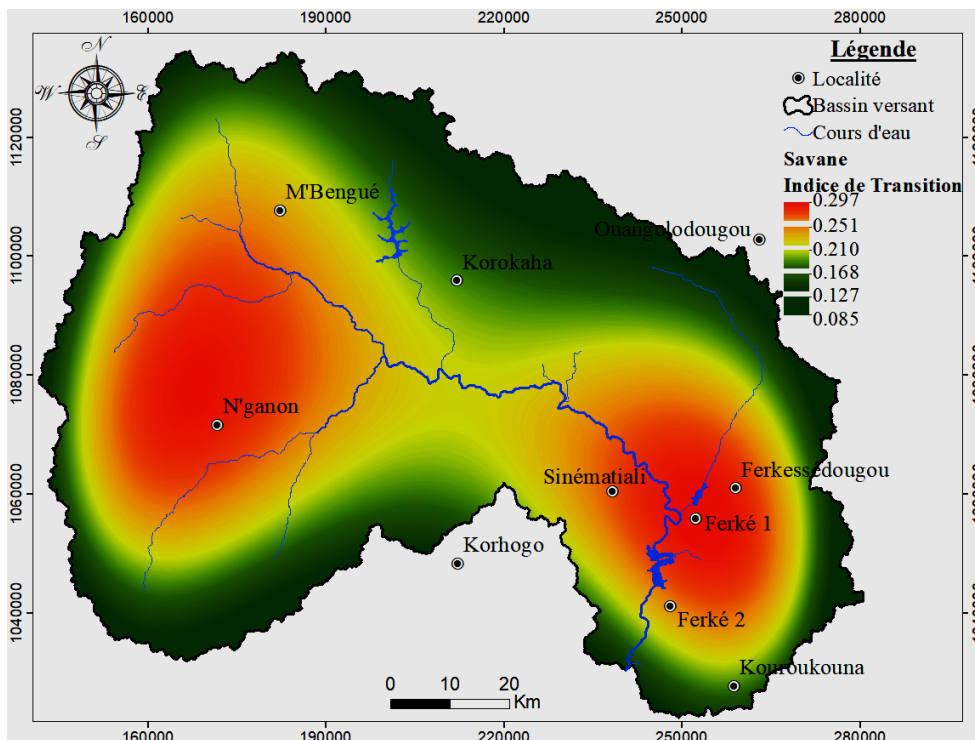


Fig. 16. Tendence du changement global des savanes sur la période 1990-2006

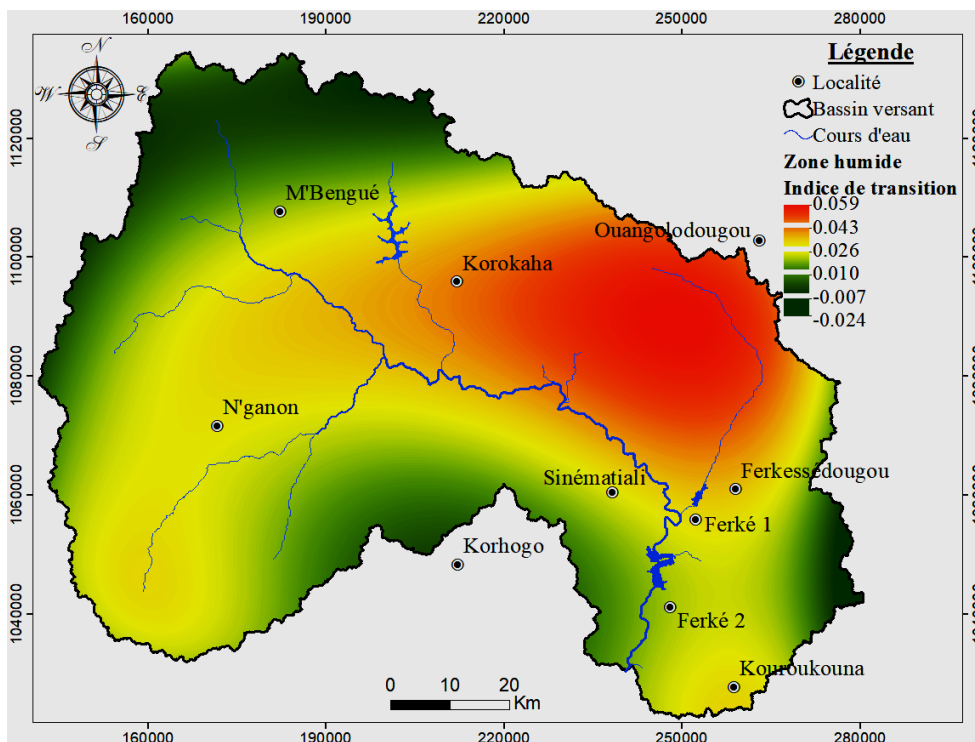


Fig. 17. Tendence du changement global des savanes et zones humides entre 1990 à 2006

4.1.3.2 SIMULATION DE L'OCCUPATION DES SOLS DE 2020 ET VALIDATION DU MODÈLE LCM

Dans cette partie, la chaîne de Markov a été appliquée pour déterminer les potentielles transition en 2020 sous forme d'une matrice de probabilité (tableau X). D'après cette matrice, les changements de l'occupation des sols peuvent arriver à

toutes les catégories à l’horizon 2020. Parmi ces catégories, les possibilités de changement pour les lambeaux de forêt, cultures ou jachères, Bâti ou sols nus, Zones humides et Plans d’eau sont assez élevées (valeurs sur la diagonale principale de la matrice inférieures 0,5). Tandis que les changements pour les savanes, sont relativement faibles (valeurs supérieures 0,6).

Tableau 9. Matrice des probabilités de transition de l’occupation des sols de 2020

		Occupation du sol (2020)					
		Lambeau de forêt	Savane	Culture ou jachère	Bâti ou sol nu	Zone humide	Plan d’eau
Occupation du sol (2006)	Lambeau de forêt	0,3026	0,5576	0,0084	0,0907	0,0235	0,0172
	Savane	0,0275	0,7145	0,0183	0,1666	0,0657	0,0074
	Culture ou jachère	0,1593	0,5144	0,1472	0,1487	0,0236	0,0069
	Bâti ou sol nu	0,0000	0,5050	0,0586	0,4046	0,031	0,0017
	Zone humide	0,0030	0,6271	0,0047	0,1663	0,1773	0,0215
	Plan d’eau	0,0442	0,5322	0,0025	0,1234	0,1275	0,1701

Sur la base de la matrice des probabilités de transition obtenue, la carte prédictive de l’occupation des sols à l’horizon 2020 a été générée (Figure 18). Cette carte contient les mêmes catégories de l’occupation des sols que celles de 1990 et 2006, à savoir, la catégorie des lambeaux de forêt, des savanes, des cultures ou jachères, des bâtis ou sols nus, des zones humides et des plans d’eau.

Les valeurs de la précision montrent que la précision globale et le coefficient Kappa de la carte prédictive de 82% et 0,81 respectent les valeurs recommandées qui sont de 0,80 et 80% respectivement. De plus l’application du test de Wilcoxon au seuil de significativité de 5 % aux superficies simulées et celles observées plus haut (figure 7) montre qu’il n’existe pas de différence significative entre elles avec un P-value de 0,84 et corrélation de 0,99 (figure 19). Ce qui rend le traitement acceptable et le modèle viable pour la prédiction. Tout de même on observe que le modèle LCM surestime les superficies des bâtis et sols nus.

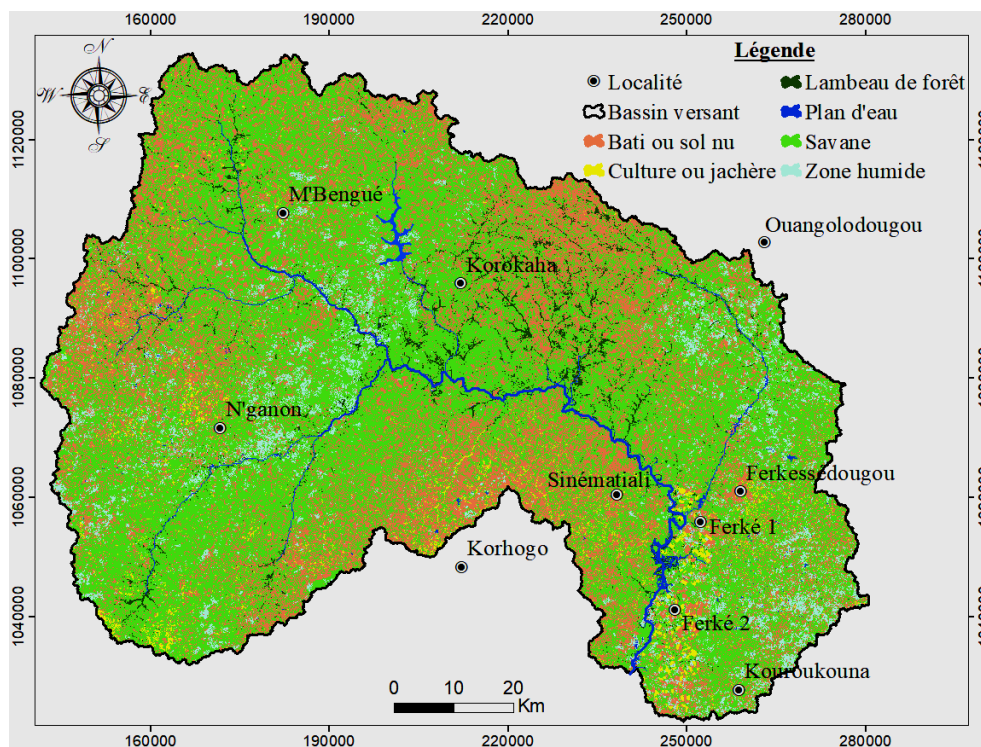


Fig. 18. Carte prédictive de l’occupation des sols de 2020

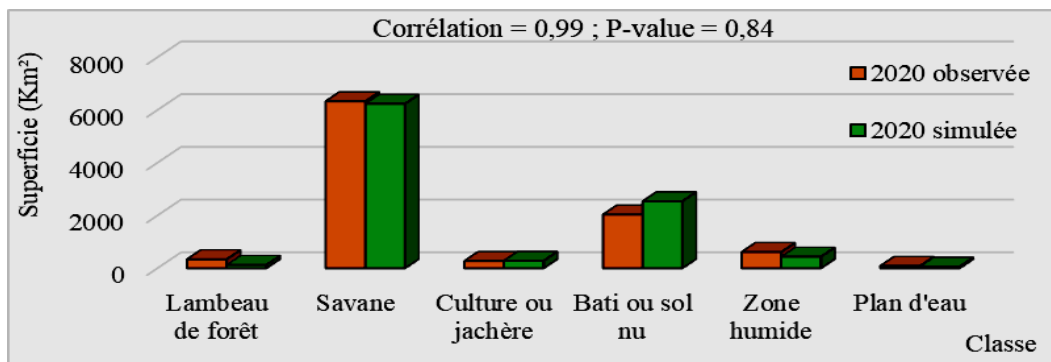


Fig. 19. Comparaison des classes d'occupation des sols simulées et observées de 2020

4.1.3.3 SIMULATION DE L'OCCUPATION DES SOLS AUX HORIZONS 2035 ET 2050

La précision de la carte prédictive a permis de valider la stabilité du modèle LCM. Donc, elle nous permet d'appliquer ce modèle pour la prédiction de l'occupation des sols à l'horizon 2035 et 2050. Les cartes prédictives de l'occupation des sols à l'horizon 2035 et 2050 pour le bassin versant du Haut Bandama sont présentées dans la figure (20 et 21 respectivement). Ces figures montrent que l'expansion des zones bâties ou sols nus est élevée plus à l'est de la localité de Korokaha, à l'extrême Ouest du bassin versant et la zone entre Korhogo et Sinématiali. Cependant, les cultures ou jachères au Sud du bassin versant peuvent être progressivement remplacées par des sols nus ou bâtis (figure 20 et 21).

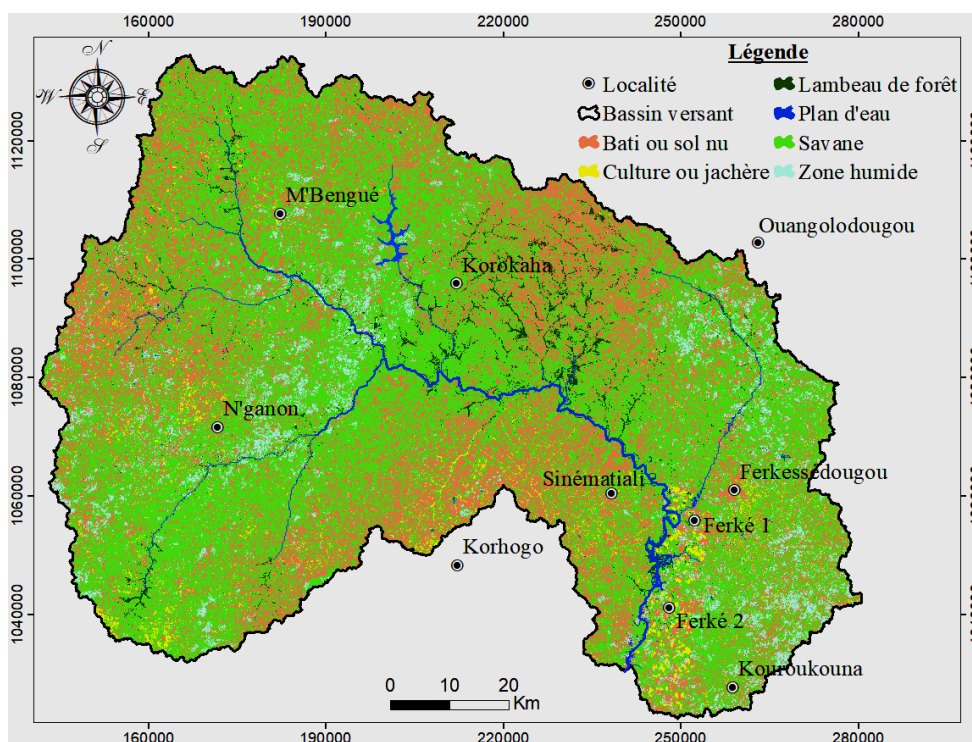


Fig. 20. Cartes de l'occupation des sols bassin versant du Haut Bandama en 2035

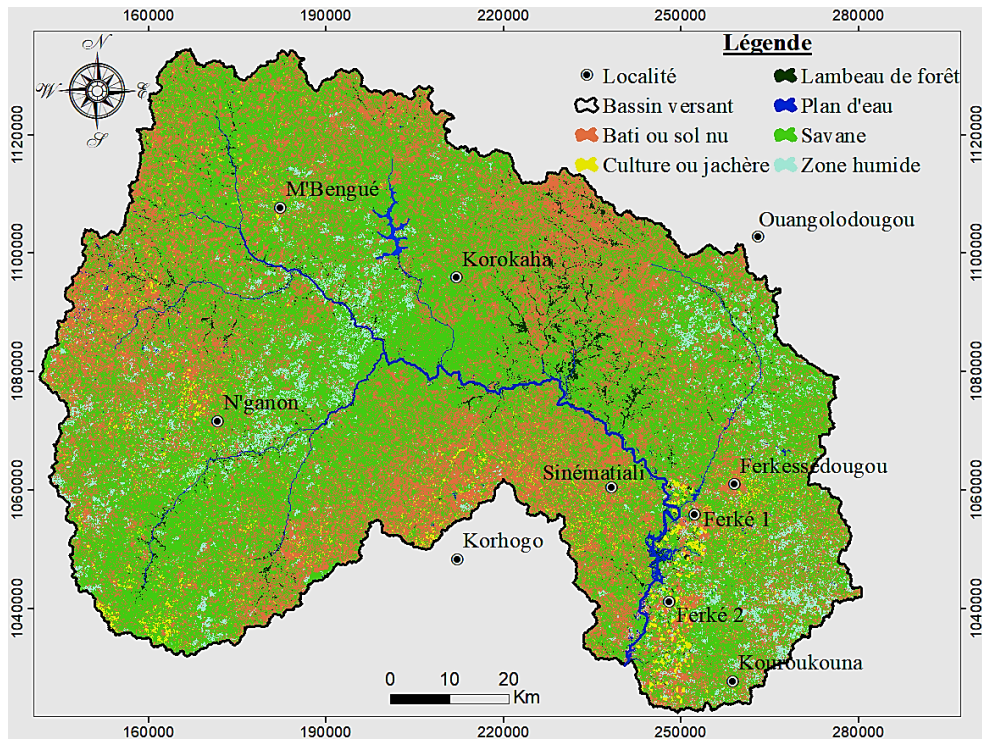


Fig. 21. Cartes de l'occupation des sols du bassin versant du Haut Bandama en 2050

4.1.3.4 ANALYSE DIACHRONIQUE DE L'OCCUPATION DES SOLS DU BASSIN VERSANT DU HAUT BANDAMA

Le tableau XI et la figure 22 présentent l'évolution de l'occupation des sols sur deux périodes (2020 à 2035) et (2035 à 2050). Ils montrent également que sur ces deux périodes, la surface des savanes diminuera très significativement tandis que la surface des bâtis ou sols nus augmentera significativement de 2020 à 2035. Cette tendance persistera sur la période de 2035 à 2050. Les terres agricoles et les zones humides évolueront et tendront à se stabiliser sur la période 2035 à 2050 tandis que la superficie des lambeaux de forêt et les plans d'eau diminueront progressivement sur l'ensemble de la période.

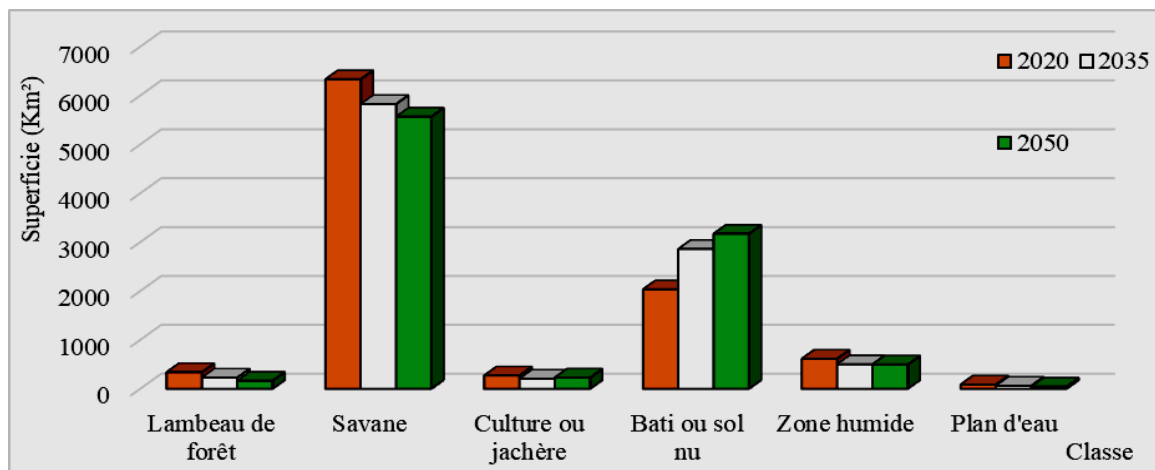


Fig. 22. Evolution de l'occupation des sols de 2020 à 2050

Tableau 10. Analyse du changement de l'occupation des sols de 2020 à 2050

Classe	Surface 2020 (Km ²)	Surface 2035 (Km ²)	Surface 2050 (Km ²)	2020-2035		2020-2050	
				Gain et perte (Km ²)	%	Gain et perte (Km ²)	%
Lambeau de forêt	340,85	229,37	163,85	-111,48	-32,7	-177	-51,9
Savane	6333,31	5826,1	5568,93	-507,21	-8,0	-764,38	-12,1
Culture ou jachère	273,19	207,82	229,79	-65,37	-23,9	-43,40	-15,9
Bâti ou sol nu	2035,89	2860,85	3183,13	824,96	40,5	1137,24	55,9
Zone humide	616,14	500,62	496,96	-115,52	-18,8	-119,18	-19,3
Plan d'eau	88,26	62,89	44,99	-25,78	-29,2	-43,27	-49,0

4.1.4 IMPACT DE LA DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE DE L'OCCUPATION DES SOLS SUR LE COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT

L'analyse de l'état de surface des sols et de la synthèse des études antérieures sur les coefficients de ruissellement des bassins versants expérimentaux a permis d'obtenir les coefficients de ruissellement K_{ri} de chaque classe d'occupation des sols du bassin versant du Haut Bandama (Tableau XII). Les zones de Lambeaux de forêt, de savane et de culture ou jachère présentent le plus faible K_{ri} . Cependant les zones de bâti ou sol nu, de zone humide et de plan d'eau présente des K_{ri} élevés.

Tableau 11. Coefficients de ruissellement selon l'occupation des sols

État de surface	Coefficient de ruissellement K_{ri} (%)
Lambeau de forêt	7
Savane	14
Culture ou jachère	21
Bâti ou sol nu	70
Zone humide	80
Plan d'eau	100

La figure 23 montre l'évolution temporelle du coefficient de ruissellement moyen annuel dans le bassin versant du Haut Bandama.

Sur la période 1990-2006, on assiste à une augmentation du coefficient de ruissellement qui passe de 18,5 % à 28,5 %. De même sur la période 2006-2020 on constate une légère augmentation allant de 28,5% en 2006 à 30,7% en 2020. Cette dernière évolution pourrait se poursuivre jusqu'à l'horizon 2050 avec 34,5% en 2035 et 36,4% en 2050.

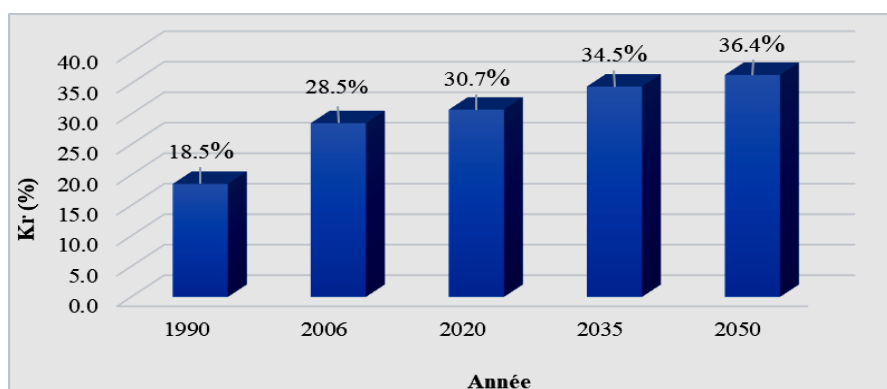


Fig. 23. Évolution temporelle du coefficient de ruissellement moyen annuel sur le bassin versant

4.2 DISCUSSION

Après traitement des images Landsat sous ENVI, six (6) unités d'occupation du sols (Lambeau de forêt, Savane, Culture et jachère, bâti et sol nu, Zone humide et Plan d'eau) dans le bassin versant du Haut Bandama à Badikaha se sont dégagées. La précision globale (comprises entre 95% et 100%) et le coefficient de Kappa (compris entre 0,95 et 0,99) obtenus lors de la classification des images montrent que les traitements effectués sur ces images sont satisfaisants. Les valeurs obtenues à partir des matrices de confusion sont supérieures à celles recommandées qui sont respectivement de 85 % et 0,8 [12]. Cela confirme la similarité des cartes d'occupation des sols simulées et observées. De façon générale on observe un dynamisme au niveau de chaque classe d'occupation des sols dans le bassin versant du Haut Bandama à Badikaha. Au cours de la période 1990-2006, on observe une importante progression de la superficie des classes de cultures ou jachères (30,44 %), des zones humides (83,10 %) et des bâtis et sols nus (400,03 %). Contrairement à ces classes, les lambeaux de forêt (- 48,89 %), des savanes (-14,88 %) et des plans d'eau (-4,80 %) connaissent une diminution importante. En effet la présence des industries de transformation de canne (SUCAF-CI) et de coton (Coton-Ivoire) dans cette partie de la Côte d'Ivoire, favorise l'implantation des hommes. D'après le Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 1998, la densité de la population passe de 33,5 habitants/km² en 1988 à 47,7 habitants/km² en 1998. C'est le même constat fait par [19] lorsqu'il affirme que les infrastructures incitent la croissance démographique et le développement des activités anthropiques qui intensifient les modifications de l'occupation du sol et des états de surface.

L'implantation des hommes n'est pas sans conséquences sur l'occupation des sols dans le bassin versant du Haut Bandama. On assiste à une régression de la superficie des classes de forêt, savane et plan d'eau en 2006 au profit des classes de cultures ou jachères, des zones humides et des bâtis et sols nus. La classe des zones humides a doublé de superficie en raison du retrait des plans d'eau et de l'exploitation de la végétation aquatique au profit des maraîchers laissant apparaître des terres humides. Les zones humides qui présentent une distribution éparse sont utiles dans le maintien de la biodiversité et la qualité des ressources en eau [3]. La dynamique de l'occupation du sol observée sur la période 1990-2006 se poursuit sur la période 2006-2020 où la superficie des classes de lambeaux de forêt, de savanes et de plans d'eau régresse respectivement de (-35,5 %), (-3,65 %) et (-11,65 %) tandis que les classes de cultures et jachères ainsi que de bâtis et sols nus sont en augmentation respectivement de 34,32 % et 22,43 %. Seule la classe des zones humides est restée relativement stable avec une variation très faible de -0,50 %. Cependant, cette modification de l'état de surface des sols sur la période 2006-2020 est moins accentuée par rapport à la période précédente (1990-2006). Ce ralentissement de la dynamique d'occupation des sols dans le bassin versant du Haut Bandama sur la période 2006-2020 est dû à l'abandon des activités de la population fuyant les zones sous contrôle des forces armées nouvelles (zone de combats fréquents) jusqu'en 2012 du Nord vers le sud du pays. C'est ce que montre les études de [20] dans le Parc national du Mont Péko, où les taux de déforestation au cours des périodes post-conflits dans les zones sous contrôle des forces nouvelles sont largement supérieurs à celui de la période des conflits. Malgré le déplacement massif des populations, on note tout de même une régression des superficies de lambeaux de forêt, de savanes et de plans d'eau au profit des cultures et jachère ainsi que les bâtis et sols nus dus probablement aux effets du changements climatiques.

A l'horizon 2035 et 2050, les cartes prédictives montrent que l'expansion des zones bâties ou sols nus auront une évolution (de 40,52% et 55,86% respectivement) sur l'ensemble du bassin. Cela sera plus accentué à l'est de la localité de Korokaha, à l'extrême Ouest du bassin versant et la zone entre Korhogo et Sinématiali. A l'inverse des classes de bâtis et sols nus, toutes les autres classes d'occupation des sols perdront en superficie au profit des bâtis et sol nu. Cette régression des classes d'occupation des sols affecte plus les classes de lambeaux de forêts de -32,71 % et -51,93 % aux horizons 2035 et 2050 respectivement. Elles sont suivies des classes de plan d'eau avec un taux -29,21% en 2035 et -49,03% en 2050.

La dynamique de l'état de surface des sols n'est pas sans conséquence sur le ruissellement. La période 1990 à 2006 a connu une augmentation du coefficient de ruissellement qui passe de 18,5% à 28,5% respectivement et de 28,5% en 2006 à 30,7% en 2020 pour la période 2006-2020. Cette dernière évolution se poursuivra jusqu'à l'horizon 2050. L'augmentation du coefficient de ruissellement est due à l'urbanisation et aux cultures extensives. En effet, l'extension du tissu urbain et des cultures provoquent une augmentation des coefficients de ruissellement des bassins versants [21]. L'urbanisation et l'agriculture se présentent donc comme le facteur anthropique à la base de l'augmentation du coefficient de ruissellement moyen sur les bassins versants [22].

5 CONCLUSION

L'utilisation de l'algorithme maximum de vraisemblance pour la classification a permis d'obtenir des coefficients de Kappa compris entre 0,95 et 1 pour la dynamique d'occupation du sol. Également les précisions globales obtenues sont assez élevées et comprises entre 95 % et 100 %). On enregistre une importante progression de la superficie des classes de cultures ou jachères

(30,44 %), des zones humides (83,10 %) et des bâtis et sols nus (400,03 %) de 1990 à 2006. Contrairement à ces classes, les lambeaux de forêt (-48,89 %), des savanes (-14,88 %) et des plans d'eau (-4,80 %) connaissent une diminution importante. Cette dynamique est conservée sur la période 2006-2020, mais avec moins d'intensité.

Les changements de l'occupation des sols observés entre 1990 et 2006 intégrés dans le sous-modèle de transition (LCM) ont montré que la plupart des catégories d'occupation du sol perdront en superficie au profit des bâtis et sol nu à l'horizon 2050. La dégradation du couvert végétal a entraîné l'augmentation du coefficient de ruissellement de 18,5% en 1990 à 30,7% en 2020. Cette évolution se poursuit jusqu'à l'horizon 2050. Ces phénomènes annoncent une désertification du bassin versant du Haut Bandama aux horizons 2035 et 2050 si des politiques de reboisements et de lutte contre l'intensification des facteurs anthropiques sur la modification de l'occupation des sols ne sont pas entreprises.

REFERENCES

- [1] Malan, D. F., Aké, A. L., Tra Bi, F. H., & Danho N., Diversité floristique du parc national des îles Ehotilé (Littoral est de la Côte d'Ivoire). *Bois et forêts des tropiques*, N° 292 (2), 2007.
- [2] Scouart M. & Lambin E. F., Approche systémique des causes de la déforestation en Amazonie brésilienne: syndromes, synergies et rétroactions. *L'Espace Géographique*, 3: 241-254, 2006.
- [3] Nghiem, V-T., Nedjai, R., L., V-A, and Charleux, L., Application of GIS and remote sensing for predicting land-use change in the French Jura Mountains with the LCM model: the impact of variables on the disturbance model', *Proceeding of the 34th Asian Conference on Remote Sensing*, Bali, Indonesia, pp. 2588-2595, ISBN: 978-602-9439-33-5, (SC04-95 à SC04-102), 2013.
- [4] Baron C., L'eau en Afrique: disponibilité et accès, *Les Nouveaux Défis de l'énergie Paris*, Economica. *Revue futuribles* n° 359, pp. 33-56, 2009.
- [5] Péné B. C., Pluviométrie et gestion de l'irrigation comme déterminants des rendements canniens en Côte d'Ivoire. In *Communications présentées au Congrès Artas-Afcas*, 12-18 octobre 1997, St. Denis de la Réunion, la Réunion. Artas-Afcas, pp. 394-413, 1997.
- [6] Kouadio, Z. A., Dynamique de l'Occupation du Sol et du Comportement Hydrologique: Cas des Bassins Versants Côtiers de l'Agnéby et du Boubo (Côte d'Ivoire), (Doctorat unique) Université d'Abobo-Adjamé, Abidjan, Côte d'Ivoire, 198, 2011.
- [7] Jofack S. V. C., Kouamé F. K., Dibi N'da H., Tankoano B., Akpa Y. L., Ngounou N. B., Cartographie de l'occupation de sol des Hauts Plateaux de l'Ouest Cameroun par réseaux de neurones appliqués à une image LANDSAT 8 OLI. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 23 (2), pp. 443-454, 2016.
- [8] Lebœuf A., Paquet A., Guide d'interprétation des mosaïques d'images satellitaires Landsat. Secteur des Forêts, Ministère des Ressources naturelles, Québec, 22, 2013.
- [9] Oszwald, J., Dynamique des formations agroforestières en Côte d'Ivoire (des années 1980 aux années 2000): Suivi par télédétection et développement d'une approche cartographique. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 304, 2005.
- [10] Soro T. D., Kouakou B. D., Kouassi E. A., Soro G., Kouassi A. M., Kouadio K. E., Yéi M.-S. O. & Soro N., Hydroclimatologie et dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire). *VertigO*, 13 (3) pp. 1-22, 2013.
- [11] Eastman J. R., *TerrSet geospatial monitoring and modeling system*, Tutorial Version 2020v.19.0. Clark University, Worcester, 2020.
- [12] Mather P. M., *Computer Processing of Remotely Sensed Images: An introduction*. 3rd ed. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, West Sussex, England, 2004.
- [13] Oñate-Valdivieso F., Sendra J. B., Application of GIS and remote sensing techniques in generation of land-use scenarios for hydrological modelling. *Journal of Hydrology*. Elsevier, Vol 395, pp. 256-263, 2010.
- [14] Huang S., The potential of multi-sensor satellite data applications in environmental monitoring with special emphasis on land cover mapping, desertification monitoring and fire detection. Thèse de l'Université München. 155, 2004.
- [15] Nghiem V-T., Impact du changement du mode d'occupation des sols sur le fonctionnement hydrogéochimique des grands bassins versants: cas du bassin versant de l'Ain. Doctorat de Université de Grenoble, Spécialité: Science de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement, Laboratoire UMR PACTE, France, 306, 2014.
- [16] Brou K., Jaugeages sur grandes rivières à Borotou, Simulation de la pluie, rapport de stage, laboratoire d'hydrologie, ORSTOM, Centre d'Adiopodoumé (Côte d'Ivoire), 44, 1985.
- [17] Yacouba, H., Da, D. E. C., Yonkeu, S., Zombre, P. & Soule, M., Caractérisations du ruissellement et de l'érosion hydrique dans le bassin supérieur du Nakambe (Burkina Faso). In *5ème conférence Inter-régionale sur l'environnement et l'eau*, Ouagadougou, pp. 318-325, 2002.

- [18] Bouvier C., Berthelot M., Janeau J. L., Campagne de simulation de pluie en milieu urbain, Yopougon. ORSTOM-CIEH, 16, 1987.
- [19] Mahé G., Variabilité pluie-débit en Afrique de l'Ouest et Centrale au 20 ème siècle: changements hydro-climatiques, occupation du sol et modélisation hydrologique. Mémoire d'HDR, Université de Montpellier II, 160, 2006.
- [20] Ousmane S., N'da Dibi H., Kouassi K. H., Kouassi K. E., Ouattara K., Crises politico-militaires et dynamique de la végétation du Parc national du Mont Péko en Côte d'Ivoire. Bois et Forêts des Tropiques, 343: pp. 27-37, 2020.
- [21] Ferhi N. et Yadh Z., Étude de l'impact de l'extension et de la densification du tissu urbain sur les coefficients de ruissellement dans le bassin versant des oueds el-ghrich et el-Greb (Tunis) par l'application de la méthode SCS aux évènements de septembre 2003, physio-géo, volume 10, url: <http://physio-geo.revues.org/4769>; doi: 10.4000/physio-geo, 4769, 2016.
- [22] Sawadogo K. Z., Simulation et optimisation du fonctionnement d'un petit barrage et de son périmètre rizicole irrigué: cas de nanan à Yamoussoukro. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 243, 2020.