

Évaluation de la dynamique de l'occupation du sol engendrée par l'orpaillage dans le bassin de Banankoro, Région de Koulikoro, Sud-Ouest du Mali

Bintou Aliou MAÏGA^{1*}, Konan Emmanuel KOUADIO¹ et Oumar SOUMARÉ²

¹ Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM), Laboratoire des Sciences des Sols, Eau et Géomatériaux (LSSEG), 01 BPV 34 Abidjan 01, Abidjan, Côte d'Ivoire

² École Nationale des Ingénieurs, ABDERHAMANE BABA TOURÉ (ENI-BAT), Laboratoire de l'Eau et de l'Environnement, 410, Av Vollenhoven BP 242 Bamako, Bamako, Mali

* Correspondance, courriel : bam24fstufhb@gmail.com

Résumé

L'objectif de cette étude est d'évaluer la dynamique spatio-temporelle du bassin de Banankoro situé au Sud-Ouest du Mali, à partir des approches de la télédétection et des SIG. La classification supervisée utilisée sur les images satellitaires Landsat TM1987 et OLI-TIR2019 a permis de générer les cartes d'occupation du sol. Le taux d'expansion global annuel calculé à partir de la superficie des différentes classes prouve qu'il y'a eu une régression d'une part et une progression d'autre part. La régression est observée au niveau des classes galeries forestières (-5,9862 %), savane boisée (-0,6467 %) et cultures (-4,1892 %). La progression est observée sur les classes eau (0,1104 %), sols nus / habitats (0,987 %) et savane arborée (4,174 %). En effet ces valeurs montrent que le bassin est passé d'une zone naturelle à une zone fortement anthropisée. Cette anthropisation est dû à une forte croissance de la population et l'effet du changement climatique qui intervient peu.

Mots-clés : *occupation du sol, orpaillage, télédétection, SIG, Bassin de Banankoro.*

Abstract

Assessment of the dynamics of land use generated by gold panning in the Banankoro basin, Koulikoro region, southwestern Mali

The objective of this study is to assess the spatio-temporal dynamics of the Banankoro basin located in southwest Mali, using remote sensing and GIS approaches. The supervised classification used on the Landsat TM1987 and OLI-TIR2019 satellite images made it possible to generate the land cover maps. The overall accuracy (98.67 % and 98.67 %) and the Kappa coefficient (98.27 % and 98.27 %) respectively for the TM1987 and OLI-TIR2019 images obtained after the classification of the images allow us to conclude that the classification is almost perfect. The values of the confusion matrix confirm the change it has had in the basin over a period of 32 years. The rate of change calculated from the area of the different classes shows that there has been a regression on the one hand and an increase on the other. The regression is observed in the forest gallery (-5.9862 %), wooded savannah (-0.6467 %) and crop (-4.1892 %) classes. The increase is observed in the water classes (0.1104 %), bare soil / habitats (0.987 %) and tree savannah (4.174 %). These values show that the basin has moved from a natural area to an anthropized area. This anthropization is due to a strong population growth and the effect of climate change, which intervenes little.

Keywords : *land use, gold panning, remote sensing, GIS, Banankoro Basin.*

1. Introduction

L'étude de l'occupation du sol est une entrée privilégiée dans l'évaluation des interactions entre l'Homme et son milieu. Ainsi, les informations issues de l'analyse de l'occupation du sol sont toujours utiles dans l'identification des stratégies appropriées pour mieux gérer l'état de l'utilisation des terres [1 - 3]. L'occupation du sol évolue selon les fluctuations climatiques et les habitudes d'exploitation des terres agricoles. Elle est une variable fondamentale pour la planification régionale ainsi que pour l'étude et la compréhension de l'environnement [4, 5]. Ainsi, le développement économique et la croissance démographique exercent des pressions de plus en plus fortes sur le milieu naturel d'où résultent leur dégradation, morcellement ou même leur disparition [6]. En effet, la pression anthropique (l'agriculture, l'élevage, l'orpaillage, etc.), l'augmentation de l'urbanisme et la sécheresse favorisent la dégradation des sols, qui a pour conséquence la déforestation et la surexploitation des sols [7]. Cependant, une partie de la couverture forestière est maintenue grâce à la création des réserves forestières par l'État, pour permettre à la fois la production de bois et la conservation de la biodiversité [8], la satisfaction des besoins pressants à court terme d'une population à forte croissance démographique conjuguée aux effets climatiques néfastes notamment pluviométriques, débouchent sur des pratiques néfastes d'utilisation des ressources naturelles conduisant à leur dégradation [9]. L'orpaillage provoque le déboisement, la déforestation, la dégradation des sols, la pollution de l'air, des sols et de l'eau, la perte de la biodiversité et le façonnement du paysage [10].

L'exploitation artisanale de l'or s'accompagne en général d'ouverture de tranchées, de puits, du décapage et du retournement des sols, avec pour corollaire la fragilisation des sols et la destruction progressive des terres arables et par conséquent la réduction des terres cultivables. L'orpaillage contribue à la destruction du couvert végétal et prédispose le sol à des processus d'érosion souvent intenses avec pour conséquences des risques de sédimentation des cours d'eau [11]. La dégradation de l'environnement et par conséquent celle des ressources naturelles est aujourd'hui d'autant plus inquiétante qu'elle ne laisse indifférents ni acteurs de développement, ni chercheurs [12]. Plusieurs méthodes ont été inventées pour l'évaluation de la dynamique de l'occupation du sol, parmi celles-ci, l'analyse diachronique et multi-date de l'occupation du sol est l'une des plus utilisées, vu que c'est une méthode qui prend également en compte la répartition spatiale des changements [13, 14]. C'est une approche couramment appliquée par plusieurs auteurs [5, 15 - 22]. Le bassin versant de Banankoro à Kangaba est une zone où l'orpaillage et l'agriculture sont les activités principales. L'orpaillage est une activité ancestrale qui, normalement, se fait en contre saison de culture. Pour les paysans qui s'adonnent à cette activité, il s'agit d'un élément de leur stratégie de survie. Aujourd'hui, l'activité a pris de l'ampleur dans la région. Cependant, elle ne peut se réaliser sans incidence négative sur l'environnement. Le bassin de Banankoro s'intègre parfaitement dans la situation présentée plus haut. C'est dans ce contexte que cette étude a pour objectif d'analyser la dynamique de l'occupation du sol engendrée par l'orpaillage sur la période 1987 à 2019.

2. Méthodologie

2-1. Présentation de la zone d'étude

Le bassin de Banankoro est situé au sud du cercle de Kangaba, dans la région de Koulikoro et au Sud-Ouest de la République du Mali, entre les latitudes : 11°35' et 11°55' Nord et les longitudes : 8°35' et 8°46' Ouest (*Figure 1*). Il a une superficie égale à 384,1 km² pour une population de 29785 habitants [23]. Le bassin de Banankoro est à cheval sur deux communes rurales (Kaniogo et Nougua) et comprend douze villages dont sept pour la commune de Kaniogo et Nougua. Le climat est de type Soudano-Guinéen ou Sud-soudanien, avec une

pluviométrie oscillante entre 1000 et 1200 mm par an. Le climat est caractérisé par une alternance de deux saisons, à savoir une saison sèche (Novembre - Avril) et une saison pluvieuse (Mai - Octobre). Les températures les plus élevées sont enregistrées vers la fin de la saison sèche d'Avril à Mai [24]. Le relief est constitué d'une alternance de plateaux presque plats, couverts de sols graveleux peu profonds et de petites vallées érodées en amont et comblées en aval par des alluvions épaisses. Les altitudes de la zone oscillent entre 250 et 500 m. L'Ouest et le Sud du Mali, auxquels appartient le bassin de Banankoro, sont composés entièrement de terrains birimiens connus depuis le Moyen Age, pour leur potentiel aurifère [25].

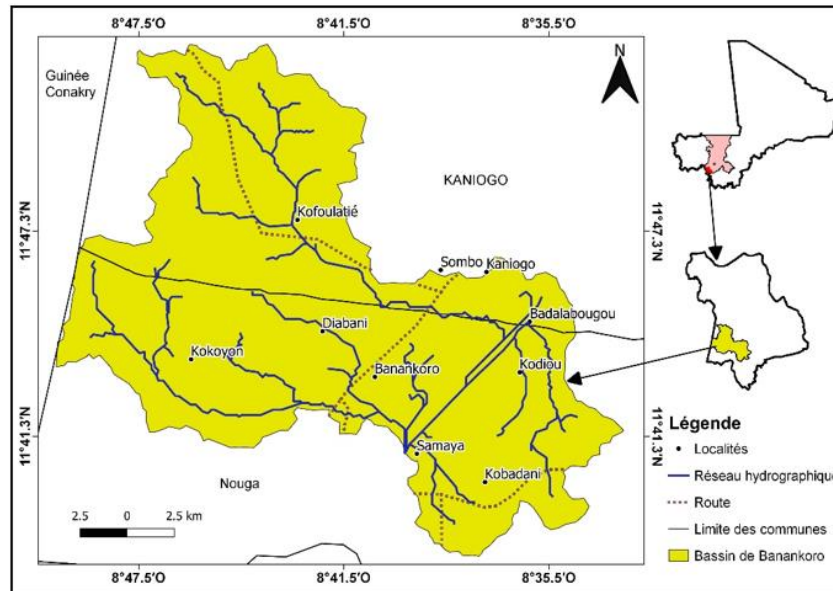


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (Maïga, 2020)

2-2. Données utilisées

L'étude étant basée sur l'analyse de la dynamique de l'occupation du sol, les images Landsat TM 1987, et OLI-TIRS 2019 orthorectifiées ont été utilisées parce qu'elles sont disponibles, gratuites et de grandes résolutions spatiales et spectrales. Après la correction géométrique, L'Analyse en Composante Principale (ACP) et l'indice NDVI sont mis en œuvre et ensuite la composition colorée PC1, PC2 et PC3 a permis de retenir six classes dont la classe eau, sols nus / habitats, galeries forestière, savane boisée savane arborée et cultures.

2-3. Classification

Il existe deux types de classification à savoir la classification non supervisée et la classification supervisée. La bonne connaissance de la zone d'étude nous a permis d'opter pour une classification supervisée. Cette méthode a été utilisée par plusieurs auteurs comme pour détecter des changements de l'occupation du sol [5, 21, 26 - 28]. Elle consiste à appliquer le même traitement à chaque pixel, indépendamment des pixels voisins. On retrouve au sein de la classification supervisée plusieurs types de classifications (classification hypercube, classification par la Distance minimum, classification par la Distance de Mahalanobis, classification par le Maximum de vraisemblance, etc.). Cette méthode permet de fournir l'information détaillée du changement et préparer des cartes de changement [26, 28, 29] La classification supervisée utilisée dans cette étude est l'algorithme du maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood) qui repose sur la règle de Bayes, car elle a donné de bons résultats au cours des travaux de plusieurs auteurs parmi lesquels [1, 2, 5, 27, 30 - 34]. Sous le logiciel de traitement d'image ENVI 5.3 utilisé, le processus de classification a été opéré à travers la définition de la légende ou le renseignement du ROI (Regions Of Interest) ; la sélection des échantillons de

parcelles d'entraînement ; la description, le renseignement des différentes classes. Cette méthode calcule la probabilité d'appartenance d'un pixel à une classe donnée. Le pixel sera affecté à la classe pour laquelle la probabilité est la plus forte. Cependant, si cette probabilité n'atteint pas le seuil escompté, le pixel est classé "inconnu". La qualité de la classification obtenue a été évaluée à l'aide des paramètres calculés par la matrice de confusion que sont la précision globale et le coefficient Kappa [35, 36]. La matrice de confusion affiche les statistiques de la précision de classification d'une image, notamment le degré de classification erronée parmi les diverses classes. Elle est calculée avec les valeurs exprimées en pixels et en pourcentage. Les valeurs de classification du coefficient sont consignées dans le **Tableau 1**. La vectorisation constitue la dernière étape du traitement des images. Elle a consisté à convertir les images classifiées du mode raster en mode vecteur (polygones) dans le but de faciliter leur gestion dans le logiciel d'analyses SIG, ArcGIS 10.

Tableau 1 : Appréciation du coefficient Kappa [37]

| Valeurs | Catégories |
|-------------|------------------------|
| 0 à 0,20 | Accord très faible |
| 0,21 à 0,40 | Accord faible |
| 0,41 à 0,60 | Accord modéré |
| 0,61 à 0,80 | Accord substantiel |
| 0,81 à 1 | Accord presque parfait |

2-4. Analyse de la dynamique de l'occupation du sol

L'analyse des changements survenus sur toute la période d'étude a été faite par une comparaison post-classification. Elle produit une matrice de détection des changements issue de la comparaison entre les pixels de deux classifications entre deux dates [36]. A partir de cette situation, le taux de changement global (Tg) et le taux moyen annuel d'expansion spatiale (Tc) ont été calculés. Les changements à l'échelle globale ont été déterminés en ressortant les superficies des différentes unités d'occupation du sol pour chaque année. Les changements ont été déterminés sur la période 1987 - 2019. Cela a consisté à effectuer le rapport entre la différence des superficies et les superficies initiales pour chaque période. Dans un second temps, nous sommes passés à une analyse approfondie, en évaluant les changements intervenus au sein de chaque unité d'occupation du sol prise isolément. Cette analyse se fait par le calcul du taux de changement (Tc) ou taux moyen annuel d'expansion spatiale, couramment utilisé dans les études sur le changement d'occupation du sol [38]. Ce taux de changement s'évalue à partir de la **Formule** suivante :

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

Tg est le taux d'expansion global annuel (%), S_1 la superficie de la classe à la date t_1 , S_2 la superficie de la classe à la date t_2 ($t_2 > t_1$) et t le nombre d'années entre les deux dates.

3. Résultats

3-1. Classification

La classification supervisée appliquée aux images Landsat TM et OLI-TIR a permis d'établir les cartes d'occupation du sol. De l'analyse des images, six classes d'occupation du sol ont été identifiées : les galeries forestières, la savane boisée, la savane arborée, les sols nus / habitations, l'eau et les cultures. Une classification est fiable si et seulement si le pourcentage de la précision globale et du coefficient Kappa est

supérieur à 80 %. La classification est évaluée par la matrice de confusion. Les tableaux de la matrice de confusion affichent dans la diagonale les pixels bien classés et les pixels non bien placés en hors diagonale.

❖ *Précision de la classification de l'image TM 1987*

Les résultats de l'analyse de fiabilité sont présentés dans le **Tableau 2**. Ce tableau montre pour chacune des classes, le niveau de fiabilité moyen et les principales confusions observées. La précision globale est de 96,08 % pour l'image de 1987 et le coefficient Kappa est 0,95 %. Le **Tableau 2** affiche dans la diagonale les pixels bien classés et les pixels non bien placés en hors diagonale. Ce tableau montre pour chacune des classes, le niveau de fiabilité moyen et les principales confusions observées.

Tableau 2 : Matrice de confusion en pourcentage de la classification de l'image de 1987

| 1987 | | | | | | | |
|-----------------------------|------|------|------|-----|-----|-------|-------------|
| Précision globale = 96,08 % | | | | | | | |
| Coefficient Kappa = 0,95 % | | | | | | | |
| Classes | Eau | Sn/H | FG | SB | SA | C | Pourcentage |
| Eau | 99,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11,48 |
| Sn/H | 0 | 99,4 | 0 | 0,2 | 0,1 | 0 | 9,06 |
| FG | 0 | 0,43 | 95,8 | 7,3 | 0 | 0 | 32,25 |
| SB | 0 | 0 | 3,88 | 88 | 1,1 | 0,48 | 16,2 |
| SA | 0 | 0 | 0 | 0,2 | 98 | 0 | 25,72 |
| C | 0,9 | 0,22 | 0,36 | 4,2 | 0,5 | 99,51 | 4,99 |
| Total | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

FG : forêt galerie, S.B. : savane Boisée, S.A. : savane Arborée, Sn/H : sols nus / habitats et C. : cultures.

La matrice de confusion prouve une bonne classification des différentes classes, néanmoins le **Tableau 2** montre qu'il y a quelques confusions des pixels entre les classes.

- 0,9 % de la classe du plan d'eau est confondue à la classe aux cultures ;
- 0,43 % et 0,22 % de la classe des sols nus / habitations sont confondue aux classes de forêt galerie et des cultures;
- 3,88 % et 0,36 % de la classe de forêt galerie sont associés respectivement aux classes de savane boisée et des cultures ;
- 0,2 %, 7,3 % 0,2 % et 4,2 % de la classe savane boisée sont confondus respectivement aux classes de sols nus / habitations, des forêts galeries, de savane arborée et des cultures;
- 0,1 %, 1,1 % et 0,5% de la classe de la savane arborée sont octroyés respectivement aux classes de sols nus /habitations, de la savane boisée et des cultures ;
- 0,48 % de la classe des cultures est confondus à la classe de savane boisée.

Les confusions les plus élevées sont observées entre les classes de savane boisée et de forêts galerie (7,3 %) et entre les classes de savane boisée et des cultures (4,2 %). Ces confusions peuvent s'expliquer par le fait que deux entités se comportent du point de vue radiométrique de la même manière, c'est-à-dire qu'elles ont la même réflectance. A l'issue de l'analyse du **Tableau 2**, la classe forêt galerie a un pourcentage plus élevé par rapport aux autres classes soit 32,25% du bassin pendant que le plus petit pourcentage est présenté par les cultures soit 4,99 %.

❖ *Précision de la classification de l'image OLI-TIR 2019*

Les résultats de la classification sont validés par la matrice de confusion. La précision globale est de 98,67 % et le coefficient Kappa est de 0,98 %. Les valeurs de la matrice de confusion sont consignées dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : Matrice de confusion en pourcentage de la classification de l'image de 2019

| 2019 | | | | | | | |
|-----------------------------|------|-------|-------|------|-------|-----|-------------|
| Précision globale = 98,67 % | | | | | | | |
| Coefficient Kappa = 0,98 % | | | | | | | |
| Classes | Eau | S.n/H | F.G | S.B | S.A | C. | Pourcentage |
| Eau | 98 | 1,08 | 0 | 2,9 | 0 | 0 | 15 |
| Sn/H | 0,33 | 98,61 | 0,2 | 0 | 0 | 0 | 21 |
| F.G | 0 | 0 | 98,61 | 0 | 0 | 0 | 8 |
| S.B | 1,66 | 0 | 0 | 96,4 | 0,38 | 0 | 13 |
| S.A | 0 | 0 | 1,57 | 0,76 | 99,62 | 0 | 38 |
| C. | 0 | 0,31 | 0 | 0 | 0 | 100 | 6,2 |
| Total | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Sn/H : sols nus / habitats ; FG : forêt galerie ; S.B : savane Boisée ; S.A : savane Arborée et C. : cultures.

D'une manière générale, la matrice de confusion permet de conclure que les classes d'occupation identifiées sont bien classées car la matrice dépasse 70 % sauf la classe des forêts galerie. La classe eau a une précision de 98 %. Les classes sols nus /habitats et forêts galerie ont une précision de 98,61 %. La classe savane boisée a une précision de 96,4 %, les classes savane boisée et cultures ont respectivement une précision de 99,62 % et 100 %. La classe des cultures est parfaitement classée. Malgré la fiabilité de la matrice de confusion, quelques confusions existent entre les classes :

- 0,33 % et 1,66 % de la classe eau sont confondus respectivement aux classes des sols nus / habitats et de la savane boisée ;
- 1,08 % et 0,31 % de la classe des sols nus /habitats sont octroyés respectivement aux classes eau et des cultures ;
- 0,2 % et 1,57 % de la classe de forêt galerie sont associés respectivement aux classes des sols nus / habitats et de la savane arborée ;
- 2,9 % et 0,76 % de la classe de la savane boisée sont confondus respectivement aux classes eau et de la savane arborée ;
- Seulement 0,38 % de la classe de la savane arborée est confondus à la classe de la savane boisée.

La confusion la plus élevée est identifiée entre les classes savane boisée et eau (2,9 %) et la plus petite entre les classes de forêt galerie et les sols nus / habitats. La seule classe qui n'a pas eu de confusion est la classe des cultures. Le pourcentage des classes par rapport à la superficie du bassin est différent d'une classe à une autre, le plus élevé est présenté par la classe de la savane boisée soit 38 % de la superficie du bassin. Le plus petit pourcentage est indiqué par la classe des cultures soit 6,2 % de la superficie du bassin comme c'est le cas pour l'année 1987. Les valeurs de la matrice de confusion des différentes classes témoignent la concordance entre les résultats de la classification et la réalité spatiale observée sur les images. Les valeurs des différents indicateurs de classification témoignent d'une bonne correspondance entre le résultat de la classification et la réalité spatiale contenue dans les images. Les classifications obtenues sont donc valides. Après cette évaluation de la classification supervisée, voyons la tendance générale de l'occupation du sol du bassin à travers une étude diachronique.

3-2. Évaluation de la dynamique de l'occupation du sol sur la période de 1987 - 2019

L'évaluation qualitative de la dynamique de l'occupation du sol passe par la présentation de la carte d'occupation des années 1987 et 2019. Une comparaison visuelle des deux cartes *Figures 2 et 3* ainsi que la superficie et le taux d'expansion spatiale annuelle (*Tableau 4*) de différentes classes permettent d'observer les modifications spatio-temporelles qui ont eu lieu sur la période 1987 - 2019.

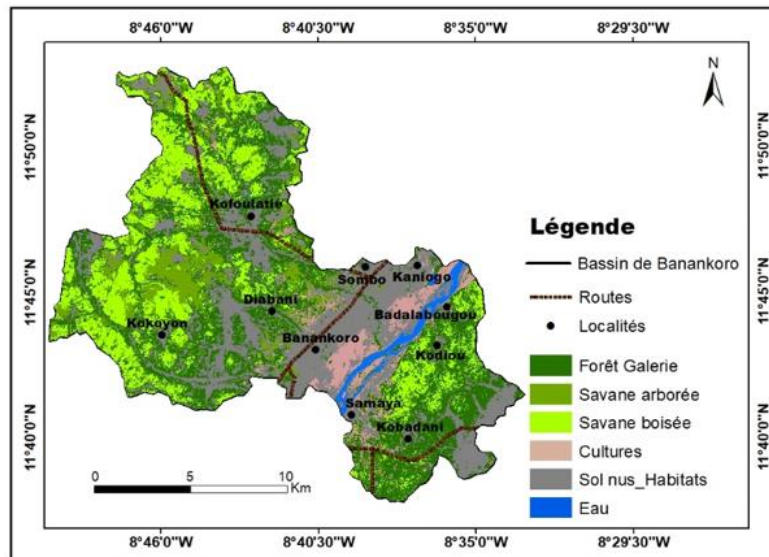


Figure 2 : Carte d'occupation du sol de TM 1987 (Maïga, 2020)

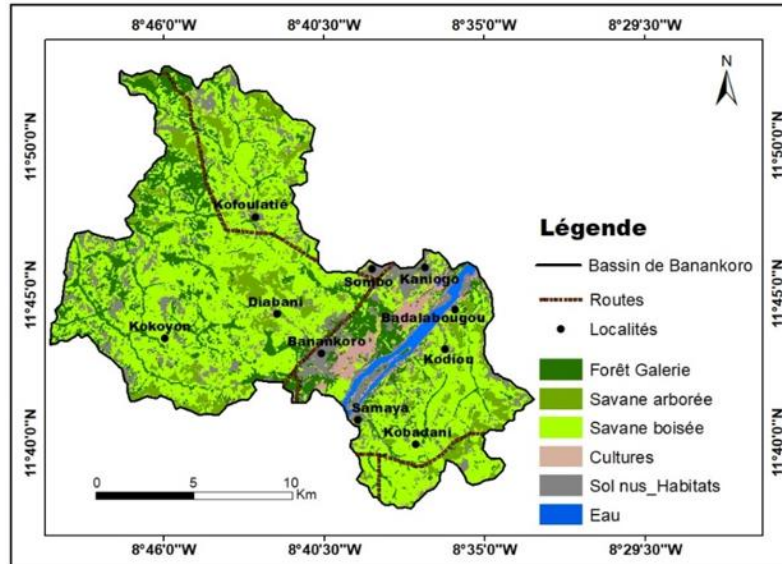


Figure 3 : Carte d'occupation du sol de l'image OLI-TIR 2019 (Maïga, 2019)

Afin de mieux apprécier les changements opérés sur les classes d'occupation du sol, le taux de changement pendant la période 1987 - 2019 a été déterminé. L'analyse des valeurs du taux de changement montre que les valeurs positives indiquent une "progression" et les valeurs négatives, une "régression". Les valeurs proches de zéro indiquent que la classe est relativement "stable". Le tableau du calcul du taux de changement montre que les formations naturelles ont subi des transformations. La valeur de la superficie, du taux de changement global (Tg) et du taux d'expansion spatiale (Tc) des différentes classes sur la période 1987 - 2019

est consignée dans le **Tableau 4**. Pendant une période de 32 ans, il y'a eu des régressions d'une part et des progressions d'autre part dans les différentes classes.

Tableau 4 : Évolution de la dynamique de l'occupation du sol sur la période de 1987 - 2019

| Classes | Année 1987 | | Année 2019 | | Variation (%) | Tg |
|---------|------------------------|----------------|------------------------|----------------|---------------|-------|
| | Sup (km ²) | Proportion (%) | Sup (km ²) | Proportion (%) | | |
| Eau | 7,29 | 11,48 | 7,55 | 15 | 3,52 | 0,11 |
| Sn/h | 49,32 | 9,06 | 67,53 | 21 | 11,94 | 0,99 |
| G F | 96,83 | 32,25 | 13,57 | 8 | -24,25 | -5,96 |
| S B | 160,57 | 16,2 | 130,47 | 13 | -3,2 | -0,65 |
| S A | 42,73 | 25,72 | 158,15 | 38 | 12,28 | 4,17 |
| C | 27,11 | 4,99 | 6,89 | 6,2 | 1,21 | -4,19 |

Sn/H : sols nus / habitats ; G.F : galeries forestières ; S.B : savane Boisée ; S.A : savane Arborée, C. : cultures, Sup. : superficie et Tg : taux d'expansion global annuel.

La variation entre les proportions correspond au taux de changement global. L'analyse du **Tableau 4** combinée à celle des cartes d'occupation du sol, montre une progression sur quatre classes :

- la classe eau est passée de 7,29 km² en 1987 à 7,55 km² en 2019, avec un taux de changement global de 3,52 % et un taux d'expansion global annuel de 0,11 %, cette classe est restée stable sur toute la période ;
- La classe sols nus / habitats est passée de 49,42 km² en 1987 à 67,53 km² en 2019, avec un taux de changement global de 11,94 % et un taux de changement spatial de 0,99 %, cette classe est restée également stable;
- la classe savane arborée a subi un grand changement, la superficie est passée de 36,75 km² en 1987 à 158,15 km² en 2019, avec un taux de changement global de 12,28 % et un taux de changement spatial de 4,17 %.

La progression des classe eau et sols nus / habitats est presque nulle. La régression est observée au niveau de trois classes :

- la classe galeries forestières est passée de 67,77 km² en 1987 à 13,57 km² en 2019, avec une variation de 24,25 % et un taux d'expansion global annuel -5,99 %, cette classe a subi une forte réduction ;
- la classe savane boisée est passée de 160,57 km² en 1987 à 130,471 km² en 2019, avec un taux de changement global de -3,2 % et un taux d'expansion global annuel de -0,6467 %, cette réduction est stable ;
- la classe de cultures est passée de 27,11 km² en 1987 à 6,893 km² en 2019, avec un taux de changement global de 1,21 % et un taux d'expansion global annuel de -4,19 %, cette classe a subi une forte réduction.

Durant cette période le bassin est passé d'une zone naturelle à une zone anthropisée qui est dû en grande partie à l'augmentation des activités anthropiques.

4. Discussion

A partir des images Landsat TM 1987 et OLI-TIR 2019, six classes ont été déterminées (eau, sols nus / habitats, forêt galerie, savane boisée, savane arborée et les cultures. Les valeurs de la précision globale sont de 96,08 % et 98,67 % et le coefficient Kappa est de 98,27 % et 94,95 % respectivement pour les images TM1987 et OLI-TIR2019, ces valeurs confirment que les cartes d'occupation du sol générées à partir des images sont de qualité suffisante. Cependant, il existe quelques confusions, la matrice de confusion est jugée acceptable lorsque la précision globale dépasse 80 % [36]. Ce pendant quelques confusions existent dont la plus grande confusion est de 7,3 % entre la savane boisée et la forêt galerie en 1987 et 2,9 % entre les classes forêt galerie et eau en 2019. Les plus petites confusions sont observées entre la savane arborée et les sols nus / habitations. Ces confusions peuvent s'expliquer par le fait que ces classes ont la même réflectance. Ces valeurs de confusion sont très faibles et satisfaisantes par ce qu'elles ne dépassent pas 70 % [21, 39]. Les valeurs du coefficient Kappa sont de 98,27 % en 1987 et 94,95 % en 2019. Ces valeurs sont acceptables au regard du coefficient Kappa qui dépasse 70 % [37]. Ces résultats corroborent avec ceux de [5] qui ont travaillé à Tortiya, au Nord de la Côte d'Ivoire et ont obtenu une précision globale de 86,51 % et 86,57 % respectivement pour les images satellitaires de 1986 et de 2000. Ils confirment également les travaux de [21] qui a obtenu une précision globale de 95,76 % et de 97,41 % respectivement pour les images de 1986 et de 2000, dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. La dynamique de l'occupation du sol montre qu'il y'a une progression et une régression. La plus faible régression est observée dans la classe de savane boisée (-0,65 %) et les plus fortes régressions est observée au niveau de la classe de forêt galerie (-5,96 %) et les cultures (-4,19 %). Cette régression s'explique par la diminution générale de la pluviométrie au Mali couplée à des périodes de sécheresses successives a entraîné un déplacement des isohyètes jusqu'à 200 km au sud du pays [40]. Certains effets de la végétation au Mali est liés d'une part, à la diminution de la pluviométrie et d'autre part, à la variabilité climatique.

Les variabilités climatiques interviennent de manière indirecte par le prolongement des périodes de chaleur et l'assèchement des milieux induisant une activation de stress physiologiques pour l'arbre qui pourrait réduire ses systèmes de défense contre les attaques pathologiques [21, 41]. En effet pour certaines espèces végétales de Mali-Sud, il a été constaté une augmentation de la mortalité en lien avec l'aridité croissante du climat. Cette aridité s'est traduite par une réduction de la disponibilité en eau utile et en nutriments, limitant ainsi, le fonctionnement physiologique des arbres [28]. La régression des classes peut aussi s'expliquer par la multiplication des activités anthropiques (l'agriculture, l'orpaillage, l'élevage, etc.). Pendant la même période, il y 'a eu aussi des progressions. La plus faible progression est observée dans les classes eaux (0,11 %) et sols nus / habitations (0,99 %) et la plus forte progression est observé au niveau de la classe de savane arborée (4,17 %). À partir de l'analyse des cartes, il apparaît que la classe de forêt galerie et de savane boisée ont progressivement cédé leur place à la savane arborée ceci peut s'expliquer par l'intensification des activités anthropiques (l'orpaillage, l'agriculture, l'élevage, etc.). Cette progression est causée, d'une part, par la croissance galopante du nombre d'orpailleurs sur les sites et, d'autre part, par les effets néfastes du changement climatique. La progression du plan d'eau est liée à la mise en eau du barrage de Sélingué et l'apport d'eau pluvial pendant la saison pluvieuse. Les tendances de progression et régression obtenues à partir des valeurs du taux d'expansion global annuel corroborent avec les travaux de recherche des références [42] qui a trouvé également la régression du couvert végétale.

5. Conclusion

L'étude de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans le bassin versant du bassin de Banankoro a été évaluée grâce à la potentialité qu'offrent les outils de la télédétection et du système d'information géographique (SIG). Ces approches de la télédétection et des SIG permettent d'appréhender la dynamique du bassin entre 1987 et 2019. L'étude menée sur une période de 32 ans a mise en évidence une progression et une régression. Les progressions les plus faibles sont observées dans les classes du plan d'eau (0,11 %) et les sols nus /habitations (0,99 %) et la plus forte est donnée par la classe de savane arborée (4,17 %). Les régressions les plus élevées sont observées dans les classes de forêt galerie (-5,96 %) et des cultures (-4,19 %), la plus faible régression est identifiée dans la classe de savane boisée (-0,65 %). Les régressions observées sont dû à l'augmentation de la population et à l'intensification des activités anthropiques (l'agriculture, l'urbanisation et l'orpaillage). Ces résultats montrent que le bassin est passé d'un milieu naturel à un milieu fortement anthropique.

Références

- [1] - J. F. MAS, Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. *Journal Canadien de Télédétection*, 26 (4) (2000) 349 - 362
- [2] - D. LU, P. MAUSEL, E. BRONDIZIO et E. MORAN, Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25 (12) (2004) 2365 - 2407
- [3] - G. M. FOODY, Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 80, (2002) 185 - 201
- [4] - M. A. SARR, Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat. *Cybergeog*, (2010) 472 p.
- [5] - T. D. SORO, B. D. KOUAKOU, E. A. KOUASSI, G. SORO, A. M. KOUASSI, K. E. KOUADIO, M. O. S. YEI, N. SORO, Hydroclimatologie et dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire). [VertigO] *La revue électronique en sciences de l'environnement*, 13 (3) (2013) 22 p.
- [6] - LEACH et MEARNS, the lie of land international African Institute J. currey. *in Echos du costa*, (1995)
- [7] - CEA., développer l'agriculture en Afrique par des chaînes de valeur régionales. Rapport économique sur l'Afrique. Commission Economique des Nations Unies pour l'Afrique, (2009) 179 p.
- [8] - R. BELLEFONTAINE, A. GASTON, Y. PETRUCCI, Management of natural forests of dry tropical zones. *FAO Conserv. Guide* 32, (2000)
- [9] - Ministère de l'Environnement et de l'Assainissement (MEA) Place de la gestion durable des terres au Mali, (2007)
- [10] - F. ANDRIAMASINORO, J. M. ANGEL, Artisanal and small-scale gold mining in Burkina Faso: suggestion of multi-agent methodology as a complementary support in elaborating a policy, (2012) <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.04.004>
- [11] - D. MARADAN, B. OUEDRAOGO, N. THIOMBIANO, T. THIOMBIANO, K. ZEIN Analyse économique du secteur des mines liens pauvreté et environnement. *sba-Ecosys-CEDRES. Rapport MECV Burkina Faso*, (2011) 69 p.
- [12] - A. AKOGNONGBE, D. ABDOULAYE, E. W. VISSIN et M. BOKO, « Dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou, au Bénin ». *Afrique Science*, Vol. 10, N°2 (2014), 1 mai 2014, <http://www.afriquescience.info/document.php?id=3450>. ISSN 1813-548X
- [13] - S. E. FRANKLIN, M. B. LAVIGNE, M. A. WULDER and G. B. STENHOUSE, «Change detection and landscape structure mapping using remote sensing», *The Forestry Chronicle*, 78 (2002) 618 - 625

- [14] - J. A. GRIFFITH, S. V. STEHMAN, T. L. SOHL, T. R. LOVELAND, «Detecting trends in landscape pattern metrics over a 20-year period using a sampling-based monitoring programme», *International Journal of Remote Sensing*, 24 (2003) 175 - 81
- [15] - N. RAMANKUTTY et J. A. FOLEY, «Estimating Historical Changes in Global Land Cover : Croplands from 1700 to 1992», *Global Biogeochem. Cycles*, 13, 4 (1999) 997 - 1027
- [16] - A. K. BRAIMOH et P. L. G. VLEK, «Land-cover change trajectories in northern Ghana», *Environmental Management*, 36 (2005) 356 - 73
- [17] - J. LIU, M. LIU, H. TIAN, D. ZHUANG, Z. ZHANG, W. ZHANG, X. TANG, X. DENG, «Spatial and temporal patterns of China's crop land during 1990-2000: an analysis based on Landsat TM data», *Remote Sensing of Environment*, 98 (2005) 442 - 56
- [18] - K. E. N'GUESSAN, H. DIBI, M. F. BELLAN, F. BLASCO, « Pression anthropique sur une réserve forestière de la télédétection », *Revue Télédétection*, 5, 4 (2006) 307 - 323
- [19] - A. A. TIDJANI, A. OZER, S. KARIMOUNE, « Apports de la télédétection dans l'étude de la dynamique environnementale de la région de Tchago (nord-ouest de Gouré, Niger) », *Geo-Eco-Trop.*, 33 (2009) 69 - 80
- [20] - G. SORO, E. K. AHOUSI, E. K. KOUADIO, T. D. SORO, S. OULARE, M. B. SALEY, N. SORO et J. BIEMI, Apport de la télédétection à la cartographie de l'évolution spatio-temporelle de la dynamique de l'occupation du sol dans la région des Lacs (Centre de la Côte d'Ivoire. *Afrique SCIENCE*, 10 (3) (2014) 146 - 160
- [21] - A. TRAORÉ, Impacts des changements climatiques et du changement de l'occupation et de l'utilisation du sol sur les ressources en eau de l'environnement lagunaire d'Aghien et de Potou (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). Mémoire de thèse unique, Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, (2016) 51 - 52
- [22] - K. D. KPEDENOU, O. DRABO, A. P. OUOBA, D. C. E. DA, T. T. K. TCHAMIE, Analyse de l'occupation du sol pour le suivi de l'évolution du paysage du territoire ouatchi au sud-est togo entre 1958 et 2015. Cahiers du cerleshs, Presses de l'Université de Ouagadougou, 2017, XXXI (55) (2017) 203 - 228
- [23] - RECENSEMENT GENERAL DE LA POPULATION ET DE L'HABITAT DU MALI (RGPH), (2009) 60 p.
- [24] - SYNTHÈSE HYDROGÉOLOGIQUE DU MALI, (1990) 1 - 10
- [25] - J-L. FEYBESSE, Y. T. SIDIBÉ, C. M. KONATÉ, A. LACOMME, C. ZAMMIT, C. GUERROT, BRGM, CPG, DNGM. Notice explicative de la Carte géologique de la République du Mali à 1/200 000, Feuille n° NC-29-XXII, Yanfolila. Bamako (MALI) : Ministère des Mines, de l'Énergie et de l'Eau, (2006) 31 p.
- [26] - G. W. TAPBODA, J. M. FOSTING, quantification de l'évolution du couvert végétal dans la réserve forestière de Laf-Madjam au nord du Cameroun par télédétection satellitale. *Sécheresse*, Vol. 21, N°3 (2010) 169 - 178
- [27] - K. H. HOANG, M. BERNIER, J. P. VILLENEUVE, les changements de l'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Cáu (Viet-Nam). Essai sur une approche diachronique. *Revue Télédétection*, Vol. 8, N°4 (2008) 227 - 236
- [28] - H. DIALLO, I. BAMBA, Y. S. S. BARIMA, M. VISSER, A. BALLO, A. MAMA et J. BOGAERT, effets combinés du climat et des pressions anthropiques sur la dynamique évolutive de la végétation d'une zone protégée du Mali (Réserve de Fina, Boucle du Baoulé). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 22 (2) (2011) 97 - 107
- [29] - G. E. AKE, Impacts de la variabilité climatique et des pressions anthropiques sur les ressources hydriques de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody, (2010) 204 p.
- [30] - K. E. N'GUESSAN, étude de l'évolution de la végétation du « V Baoulé » (contact forêt/savane en Côte d'Ivoire) par télédétection. Télédétection et sécheresse. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris c p., (1990) 181 - 196
- [31] - S. BIGOT, T. Y. BROU, J. OSZWALD, A. DIEDHIU, facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. *Sécheresse*, Vol. 16, N°1 (2005) 5 - 13

- [32] - K. F. KOUAME, M. BERNIER, D. L. GONE, M. B. SALEY, R. LEFEBVRE, N. SORO, A. KOUDOU, intégration de données géospatiales dans un modèle hydrologique distribué pour la simulation des écoulements des eaux en milieu tropical humide de Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest). *Revue Télédétection*, Vol. 7, N°1-2-3-4 (2007) 217 - 235
- [33] - M. KONE, A. AMAN, C. ADOU YAO, L. COULIBALY, K. E. N'GUESSAN, Suivi diachronique par télédétection spatiale de la couverture ligneuse en milieu de savane soudanienne en Côte d'Ivoire. *Revue Télédétection*, Vol. 7, N° 1-2-3-4 (2007) 433 - 446
- [34] - G. W. TAPBODA, J. M. FOSTING, quantification de l'évolution du couvert végétal dans la réserve forestière de Laf-Madjam au nord du Cameroun par télédétection satellitale. *Sécheresse*, Vol. 21, N°3 (2010) 169 - 178
- [35] - G. R. CONGALTON « A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data », *Remote Sensing of Environment*, 46 (1991) 35 - 37
- [36] - M. C. GIRARD et C. M. GIRARD, traitement des données de télédétection. *Dunod*, (1999)
- [37] - S. CHALIFOUX, M. NASTEV, C. LAMONTAGNE, R. LATIFOVIC, cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellitaire Landsat en hydrogéologie. *Télédétection*, Vol. 6, N°1 (2006) 9 - 17
- [38] - M. F. HADJADJ, apport des SIG et des images satellites pour la cartographie numérique de la forêt du Chettabah (Wilaya de Constantine) : Modélisation climatique et classification. Mémoire de fin d'études, Université El-Hadj Lakhdar Batna, Constantine, Algérie, (2011) 178 p.
- [39] - V. J. MAMA et J. OLOUKOI, Evaluation de la précision des traitements analogiques des images satellitaires dans l'étude de la dynamique de l'occupation du sol. *Télédétection*, Vol. 3, N°5 (2003) 429 - 441
- [40] - Ministère de l'Environnement et de l'Assainissement du Mali, rapport national sur l'état de l'environnement au Mali. Bamako : MEA, (2006) 118 p.
- [41] - D. A. WARDELL, A. REENBERG and C. TETRUP, Historical footprints in contemporary land use systems: forest cover change in savannah woodlands in the SudanoSahelian zone. *Global Environment Change-Human and Policy Dimensions*, Vol. 13, N°4 (2003) 235 - 254
- [42] - B. ISSOUF, influence des actions anthropiques sur la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans la province du Bas-Congo (R.D. Congo). *Article Sciences & Nature*, Vol. 5, N°1 (2008) 49 - 60