

## Cartographie par télédétection des changements de l'occupation du sol à partir des images Landsat dans une zone d'orpaillage, département de Dimbokro (Centre-Est, Côte d'Ivoire)

### [ Remote sensing mapping of land cover changes from Landsat images in a gold panning area, Dimbokro department (Central-Eastern, Côte d'Ivoire) ]

*Yapo Armand Patrick, Ahoussi Kouassi Ernest, and Yao Kouassi Serge Aristide*

Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR STRM), Laboratoire des Sciences du Sol, de l'Eau et des Géomatériaux (LSSEG), Université Felix Houphouët Boigny Abidjan-Cocody (UFHB), 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:** Located in central-eastern Côte d'Ivoire, the department of Dimbokro has for the past ten years been faced with the illegal and clandestine development of artisanal and small-scale gold mining (ASGM), commonly known as gold panning. This activity is having a huge impact on the environment and especially on natural resources (deforestation, loss of arable land). The aim of this study is to detect changes in land cover in the Dimbokro department using Landsat TM (1988), ETM+ (2002) and OLI (2021) images. The supervised or directed classification method with maximum likelihood and the diachronic comparison method were used. The areas of the classes obtained after the diachronic analyses were used to highlight the average annual rates of spatial expansion. This expansion between 1988 and 2021 is either progressive or regressive. A regression was observed for the dense forest (-2.99%), degraded forest (-2.32%), crop (-0.82%) and water (-1.65%) classes. In terms of change over this period (33 years), there has been an increase in the surface area of savannah (+2.67%) and buildings/bare ground (+4.12%). This study shows that changes in the landscape of the Dimbokro department are linked to a high level of human activity, leading to the degradation of natural resources in a context of climatic variability.

**KEYWORDS:** Gold panning, land use, Landsat, remote sensing, Dimbokro department.

**RESUME:** Situé au Centre-Est de la Côte de la Côte d'Ivoire, le département de Dimbokro fait face depuis une dizaine d'années au développement illégal et clandestin de l'extraction minière artisanale et à petite échelle d'or (EMAPE) communément appelé orpaillage. Cette activité provoque d'énorme répercussion sur l'environnement et surtout les ressources naturelles (déforestation, pertes de terres cultivables). L'objectif de cette étude est la détection des changements de l'occupation du sol dans le département de Dimbokro à partir des images Landsat TM (1988), ETM+ (2002) et OLI (2021). La méthode de la classification supervisée ou dirigée avec le maximum de vraisemblance et celle de la comparaison diachronique ont été utilisées. Les superficies des classes obtenues après les analyses diachroniques ont permis de faire ressortir les taux moyens annuels d'expansions spatiales. Cette expansion entre 1988 à 2021 est soit progressive ou régressive. Pour les classes forêts denses (-2,99 %), forêts dégradées (-2,32 %), cultures (-0,82 %) et eau (-1,65 %) il a été observé une régression. En termes d'évolution durant cette période (33 ans), on observe une progression des superficies des savanes (+2,67 %) et des bâtis/ sols nus (+4,12 %). Cette étude montre que les changements du paysage du département de Dimbokro sont liés à une forte anthropisation entraînant par conséquent la dégradation des ressources naturelles dans un contexte de variabilité climatique.

**MOTS-CLEFS:** Orpaillage, occupation du sol, Landsat, télédétection, département de Dimbokro.

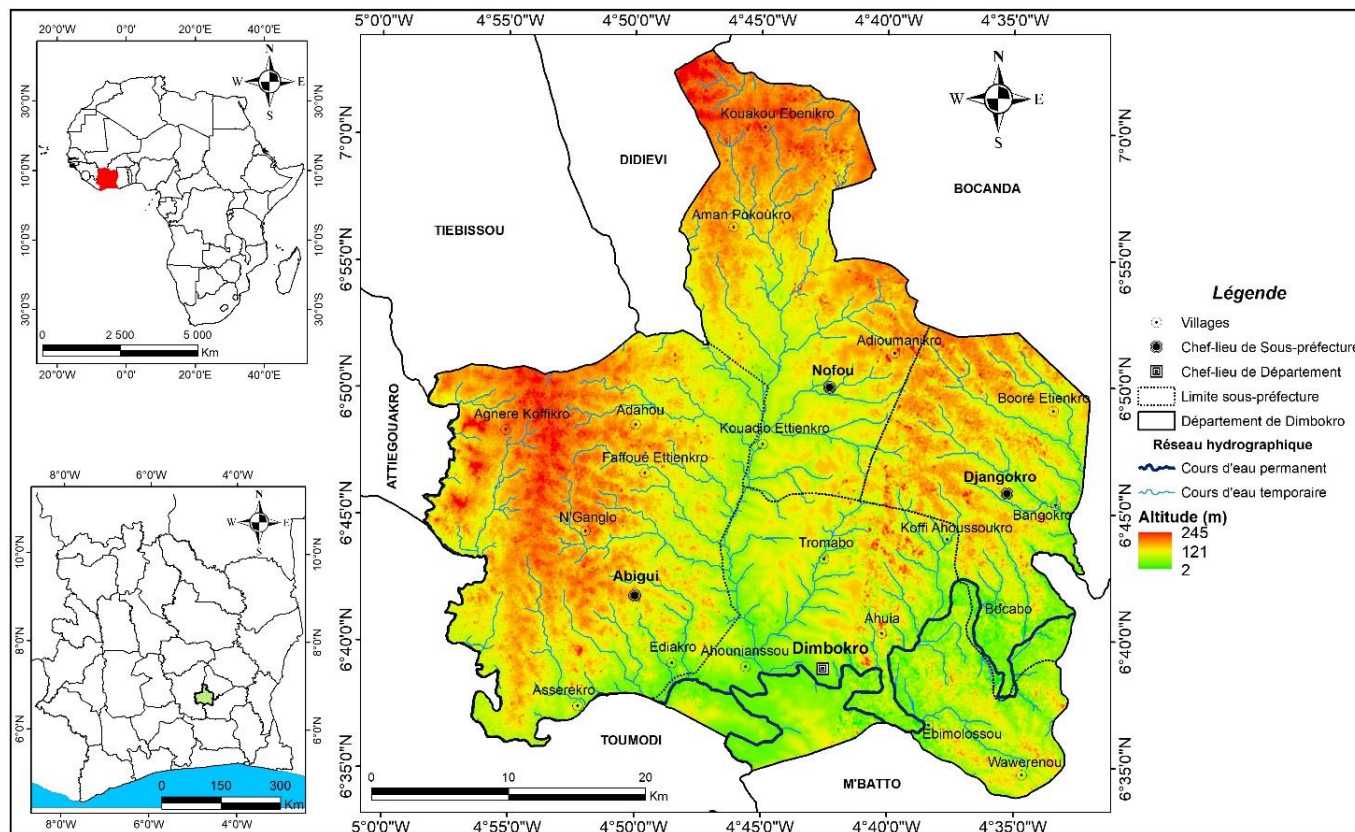
## 1 INTRODUCTION

À travers le monde toutes les politiques gouvernementales font de la lutte contre la dégradation de l'environnement une de leur priorité [1]. En effet, la plupart des activités humaines modifient plus ou moins profondément le fonctionnement des écosystèmes ou l'état de certains éléments naturels dont les êtres humains. À cela, s'ajoute la baisse de la pluviométrie depuis les années 1970 qui entraîne une modification significative du paysage et l'occupation des sols [2], [3]. Les études sur le changement de l'occupation et l'utilisation du sol permettent de comprendre les interactions entre l'Homme et son environnement. Cette thématique est devenue incontournable dans la plupart des inventaires cartographiques et de suivi des phénomènes environnementaux [4]. De plus, l'utilisation de la télédétection pour étudier et surveiller les zones dégradées par les activités d'orpaillage et leur expansion dans le temps est primordiale. Elle a été utilisée par

de plusieurs auteurs depuis les années 2020 [5], [6], [7], [8]. Aussi, le développement des techniques de la télédétection et du système d'information géographique (SIG) permet d'avoir une vision globale des phénomènes et une approche de plus en plus précise sur la dynamique de l'occupation du sol, tout en contribuant à assurer une meilleure gestion de l'environnement [9], [10]. L'exploitation de l'or que ce soit artisanale ou industrielle entraîne des dommages sur l'environnement à savoir la perte du couvert forestier, la dégradation des sols, l'augmentation de la charge sédimentaire de l'eau, la pollution de l'air et la perte de la biodiversité [11]. Cette utilisation technologique permet de quantifier les impacts environnementaux (déforestation, augmentation de la charge sédimentaire de l'eau, dégradation des sols) et l'expansion de l'orpaillage. En raison de l'exploitation aurifère, les zones affectées connaissent une évolution démographique accrue au cours des dernières décennies. Ces activités affectent le milieu naturel soit la circulation de composés toxiques soit par la dégradation des ressources forestières [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]. En effet, l'occupation du sol influence les quantités d'eau disponibles pour l'écoulement de surface et l'infiltration selon la nature des végétaux (forêts, savanes, mosaïques) [3]. L'apparition des grands sites d'orpaillage dans les années 2010 traduisent un changement réel dans la nature. C'est donc dans cette perspective que cette étude a été initiée pour évaluer la dynamique de l'occupation du sol dans le département de Dimbokro qui fait face à une prolifération des sites d'extraction artisanale d'or.

## 2 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

Le département de Dimbokro est situé au centre-est de la Côte d'Ivoire dans la région du N'Zi. Il est compris entre les longitudes 4°30' et 4°58' Ouest et les latitudes 6°33' et 7°05' Nord avec une superficie de 1527 km<sup>2</sup> (Fig. 1). Il est constitué de quatre (4) sous-préfectures (Dimbokro, Abigui, Nofou et Djangokro) et une soixantaine (60) de villages. Sa population est estimée à 102 192 habitants [14]. Le climat est de type tropical humide marqué par 4 saisons dont 2 saisons de pluies et 2 saisons sèches [15], [16]. Les précipitations sont en moyenne de 1200 mm par an et la température annuelle moyenne est d'environ 26,5 °C. Ces conditions hydroclimatiques facilitent le développement des activités agricoles qui s'y pratiquent couplés à des sols ferrallitiques et hydromorphes [17]. Le relief est relativement plat (plaines inférieures à 100 mètres) avec quelques plateaux d'altitudes comprises entre 150 et 240 mètres dans les zones Nord et Ouest. La végétation est constituée de savane (nord et centre) et de forêt dans les parties sud et est. Les aquifères rencontrés sont ceux des altérites et du socle (fissurés et fracturés) [18]. Du point de vue hydrographique il y a la présence du fleuve N'Zi et de ses affluents que sont le Kan et le Ourougo. La géologie est marquée par les roches formations éburnéennes (métagranites à biotite et des granites à muscovite et biotite) qui dans le nord et l'extrême ouest et des formations birimiennes (schistes et les grès) occupant la moitié du département de Dimbokro [15], [16].



**Fig. 1.** Location du Département de Dimbokro

### 3 MATERIEL ET METHODES

#### 3.1 DONNEES UTILISEES

Dans le but de réaliser les cartes d'occupation du sol nécessaire à l'étude de la dynamique de l'occupation du sol, les images satellitaires Landsat de la scène 196-055 ont été utilisées. Ce sont les images Landsat 5 TM (1988), Landsat ETM+ 7 (2002) et Landsat 8 OLI (2021) acquises pendant les mois de la saison sèche car le taux de nébulosité et de couverture nuageuse est réduit.

#### 3.2 METHODES

##### 3.2.1 PRETRAITEMENT DES IMAGES SATELLITAIRES

Avant de procéder à l'extraction de l'information et la classification thématique des images satellitaires Landsat, une série d'opérations a été effectuée. Ces opérations sont consacrées au prétraitement des images (corrections radiométriques et extraction de la zone d'étude). Les images brutes Landsat ont subi des traitements dans le but de les rendre lisibles avant toute interprétation. Pour se faire, l'utilisation du logiciel ENVI 5.3 a été nécessaire. Les corrections radiométriques consistent à corriger les effets des différents artefacts qui perturbent la mesure radiométrique sans pour autant modifier les données sources c'est-à-dire la valeur des pixels [19]. Par la suite, la zone d'étude (département de Dimbokro) a été extraite dans les images multispectrales Landsat ayant une résolution spatiale de 30 mètres.

##### 3.2.2 CLASSIFICATION NUMERIQUE DES IMAGES

Le traitement des images satellitaires a permis de réaliser une classification numérique des différentes images en plusieurs étapes telles que le choix des compositions colorées, définition des différentes classes et le type de classification. La technique de la composition colorée a été utilisée pour faciliter l'extraction des informations et avoir une bonne discrimination des unités d'occupations du sol en combinant les trois couleurs fondamentales rouge, vert et bleu (RVB). Les capteurs TM, ETM+ et OLI disposent respectivement de respectivement 7, 8 et 11 bandes spectrales allant du visible à l'infrarouge thermique. Ce nombre de bandes permet d'essayer de multiples combinaisons de 3 bandes afin de mettre en évidence les classes [20]. Les différentes compositions colorées utilisées dans cette étude sont présentées dans le Tableau 1.

*Tableau 1. Caractéristiques des images Landsat TM, ETM+ et OLI*

Caractéristiques	Landsat 5 TM	Landsat 7 ETM <sup>+</sup>	Landsat 8 OLI
Compositions colorées (RVB)	531	731	764

En utilisant le logiciel ENVI 5.3, les compositions colorées ont permis de distinguer les classes d'occupation du sol avec beaucoup plus de détails. Ainsi, six (6) classes d'occupation du sol ont été retenues à savoir forêts denses, forêts dégradées, savane, bâtis/ sols nus, cultures et eau. Pour chaque classe définie ou ROI (Regions Of Interest), un minimum de 30 pixels a été sélectionné. Ces pixels sont représentés sous forme de polygones facilitant l'extraction automatique des valeurs de pixels afin de produire la signature spectrale de chaque classe à partir des bandes choisies de l'image Landsat. En se basant sur la mission préliminaire effectuée en juillet 2020, le choix s'est porté sur la classification supervisée ou dirigée qui est une technique consistant à appliquer le même traitement à chaque pixel, indépendamment des pixels voisins au détriment de la classification non supervisée. Les classifications supervisées sont des méthodes couramment utilisées qui permettent un résultat rapide et généralement assez efficace pour se rendre compte des changements de l'occupation du sol. Afin d'obtenir une classification représentant l'occupation du sol l'algorithme « Maximum de Vraisemblance » (Maximum Likelihood) basé sur la règle Bayes a été choisi. Cette méthode calcule la probabilité d'appartenance d'un pixel à une classe donnée. Les pixels seront affectés à la classe pour laquelle la probabilité est la plus forte. Cet algorithme de classification si performant dans le domaine de l'évaluation de la dynamique de l'occupation du sol a été utilisé dans de nombreux travaux [2], [8], [21], [22], [23].

##### 3.2.3 ÉVALUATION DE LA PRECISION DES IMAGES

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. 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. La précision globale exprimé en pourcentage (%) s'obtient en additionnant le nombre de valeurs classées correctement et en divisant par le nombre total de valeurs [24]. Quant au coefficient Kappa K, il exprime la réduction proportionnelle de l'erreur obtenue par classification, comparée à l'erreur obtenue par une classification complètement au hasard. L'indice Kappa et se divise en cinq (5) catégories. Le Tableau 2 ci-dessous présente les différentes valeurs de l'indice kappa [25].

**Tableau 2. Valeurs des indices de Kappa [25]**

<b>Accord</b>	<b>Très faible</b>	<b>Faible</b>	<b>Modéré</b>	<b>Substantiel</b>	<b>Presque parfait</b>
Valeurs	0 à 0,20	0,21 à 0,40	0,41 à 0,60	0,61 à 0,80	0,81 à 1

Sa formule est donnée par l'équation 1 ci-dessous:

$$K = \frac{P_0 - P_c}{1 - P_c} \quad (\text{Equation 1})$$

K est le coefficient de Kappa,  $P_0$  est égal au pourcentage réel obtenu de la classification des éléments de l'occupation du sol; il est égal au quotient de la somme des chiffres de la diagonale de la matrice avec le total du nombre d'observations.

$P_c$  est l'estimation de la probabilité d'obtenir une classification correcte; pour calculer  $P_c$ , on procède de la façon suivante: on réalise les produits marginaux des valeurs des colonnes et des rangées au niveau de chaque cellule de la matrice, puis la somme des valeurs de la diagonale est divisée par le total des produits de chaque cellule de la matrice. Enfin, un filtre majoritaire avec une fenêtre 3x3 a été appliqué pour homogénéiser les rendus cartographiques. Cette opération a pour but d'affecter le pixel central du filtre à la classe la plus représentée. Les relevés sur le terrain ont permis de valider cette classification.

### **3.2.4 MISE EN ÉVIDENCE DES CHANGEMENTS**

Afin d'analyser la dynamique de l'occupation du sol de 1988 à 2021, les calculs du taux moyen annuel d'expansion spatiale ( $T_c$ ) et du taux de changement global ( $T_g$ ) ont été nécessaires. Le taux moyen annuel d'expansion spatiale ( $T_c$ ) s'évalue à partir de la Formule suivante de [26] couramment employée pour mesurer la croissance des agrégats macroéconomiques entre deux périodes données.

$$T_c = \frac{\ln S_2 - \ln S_1}{(t_2 - t_1) * \ln e} * 100 \quad (\text{Equation 2})$$

$T_c$  est le taux moyen annuel d'expansion spatiale,  $S_1$  la surface d'une classe d'unité de surface à la date  $t_1$ ,  $S_2$  la superficie de la même classe d'unité de surface à la date  $t_2$ ,  $\ln$  le logarithme népérien,  $e$  la base des logarithmes népériens ( $e = 2,71828$ ). Le calcul du taux de changement global est fait en se basant sur la Formule suivante [27].

$$T_g = \frac{S_2 - S_1}{S_1} * 100 \quad (\text{Equation 3})$$

$T_g$  est le taux de changement global,  $S_1$  la surface d'une classe d'unité de surface à la date  $t_1$ ,  $S_2$  la superficie de la même classe d'unité de surface à la date  $t_2$ . Les valeurs du taux de changement positives indiquent une « progression » et les valeurs négatives, une « régression » c'est-à-dire perte de surface. Les valeurs proches de zéro indiquent que la classe est relativement « stable ».

## **4 MATERIEL ET DISCUSSION**

### **4.1 ÉVALUATION DE LA PRÉCISION DE LA CLASSIFICATION**

L'application de la classification supervisée aux trois images satellitaires, a permis d'identifier avec précision six (06) classes et cartographier l'occupation du sol de la zone d'étude en 1988, 2002 et 2021. Les différentes classifications ont été évaluées par les matrices de confusion à partir de la précision globale et le coefficient Kappa. Les classifications sont donc jugées excellentes car la valeur du kappa est supérieure à 0,90.

#### **4.1.1 OCCUPATION DU SOL DE LANDSAT TM 1988**

Les résultats de la classification de l'image Landsat TM de 1988 sont consignés dans le Tableau 3. La précision globale obtenue est de 93,21 % avec un coefficient de Kappa de 0,91.

Tableau 3. Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat TM de 1988

Classes	Forêt dense	Forêt dégradée	Savane	Bâti/ sols nus	Cultures	Eau
Forêt dense	<b>97,38</b>	1,62	0	0,25	0,3	0
Forêt dégradée	1,58	<b>96,33</b>	2,17	0,92	2,4	0
Savane	0	0,7	<b>94,64</b>	0,97	0,91	0
Bâti/ sols nus	0	0,12	0	<b>97,18</b>	0,23	0
Cultures	1,04	1,23	3,19	0,61	<b>96,16</b>	0
Eau	0	0	0	0	0	<b>100</b>
Total	100	100	100	100	100	100

Précision globale = 93,21 %; Kappa = 0,91

L'analyse du Tableau 3 montre que les classes présentes de très bonnes classifications. On a pour la forêt dense (97,38 %), forêt dégradée (96,33 %), savane (94,64 %), bâti/ sols nus (97,18 %), cultures (96,16 %) et (100 %) pour l'eau. Certaines confusions peuvent se faire quant à la discrimination des classes.

- La classe forêt dense se confond avec la forêt dégradée (1,58 %) et cultures (1,04 %);
- La classe forêt dégradée se confond avec la forêt dense (1,62 %) et cultures (1,23 %);
- La classe savane se confond avec la forêt dégradée (2,17 %) et cultures (3,19 %);
- La classe culture se confond avec la forêt dégradée (2,4 %)

La difficulté de classer les classes savanes et cultures s'explique par le fait que ces deux classes ont quasiment les mêmes réflectances.

#### 4.1.2 OCCUPATION DU SOL DE LANDSAT ETM+ 2002

Le Tableau 3 montre que la classification de l'image Landsat ETM+ de 2002 a une précision globale de 94,64 % avec un coefficient de Kappa de 0,92.

Tableau 4. Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat ETM+ de 2002

Classes	Forêt dense	Forêt dégradée	Savane	Bâti/ sols nus	Cultures	Eau
Forêt dense	<b>96,13</b>	3,42	0	0,12	0,4	0
Forêt dégradée	2,86	<b>94,57</b>	2,65	0,17	1,19	0
Savane	0	0,41	<b>95,49</b>	1,4	1,59	0
Bâti/ sols nus	0	0,39	0	<b>97,52</b>	0,16	0
Cultures	1,01	1,21	1,86	0,79	<b>96,66</b>	0
Eau	0	0	0	0	0	<b>100</b>
Total	100	100	100	100	100	100

Précision globale = 94,64 %; Kappa = 0,92

Pour la matrice de confusion de l'image Landsat ETM+ (2002), les différentes précisions des classes sont consignées dans le Tableau 4. Ainsi, on a 96,13 % pour la forêt dense, 94,57 % pour forêt dégradée, 95,49 % pour la savane, 97,52 % pour les bâti/ sols nus, 96,66 % pour les cultures et 100 % pour l'eau. Néanmoins, il existe des confusions entre les classes:

- La classe forêt dense se confond avec la forêt dégradée (2,86 %) et cultures (1,01 %);
- La classe forêt dégradée se confond avec la forêt dense (3,42 %) et cultures (1,21 %);
- La classe savane se confond avec la forêt dégradée (2,65 %) et cultures (1,86 %);
- La classe culture se confond avec la forêt dégradée (2,4 %) et la savane (1,59 %)

#### 4.1.3 OCCUPATION DU SOL DE LANDSAT OLI 2021

La classification de l'image OLI de 2022 a été réalisée avec une précision globale égale à 97,88 % et un coefficient Kappa égal à 0,96.

Tableau 5. Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat OLI de 2021

Classes	Forêt dense	Forêt dégradée	Savane	Bâti/sols nus	Cultures	Eau
Forêt dense	98,05	0,77	0	0,05	0,32	0
Forêt dégradée	1,73	94,61	0,2	0,29	2,82	0
Savane	0	1,7	97,82	0,75	1,22	0
Bâti/sols nus	0	0,18	0,3	97,43	0,41	0
Cultures	0,22	2,74	1,68	1,48	95,23	0
Eau	0	0	0	0	0	100
Total	100	100	100	100	100	100

Précision globale = 97,88 %; Kappa = 0,96

Les classes présentes de très bonnes classifications (Tableau 5). On a pour la forêt dense (98,05 %), forêt dégradée (94,61 %), savane (97,82 %), bâti/sols nus (97,43 %), cultures (95,23 %) et (100 %) pour l'eau. Certaines confusions peuvent se faire quant à la discrimination des classes.

- La classe forêt dense se confond avec la forêt dégradée (1,73 %);
- La classe forêt dégradée se confond avec la savane (1,7 %) et cultures (2,74 %);
- La classe savane se confond avec les cultures (1,48 %);
- La classe culture se confond avec la forêt dégradée (2,82 %) et savane (1,22 %)

#### 4.2 ÉVALUATION DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL

##### 4.2.1 MISE EN ÉVIDENCE DES CHANGEMENTS

Les cartes obtenues après les classifications supervisées des images Landsat de 1988, 2022 et 2021 permettent d'avoir l'évaluation qualitative de la dynamique de l'occupation du sol (Fig. 2, 3 et 4).

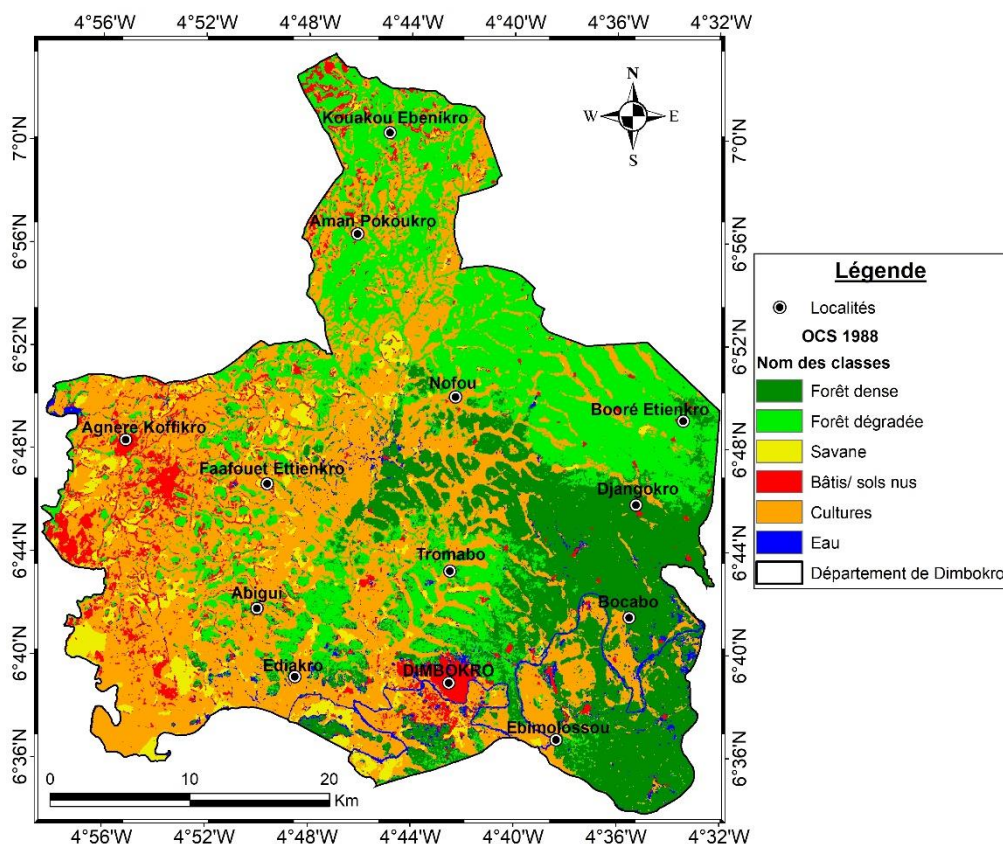


Fig. 2. Occupation du sol en 1988 à partir des images Landsat TM

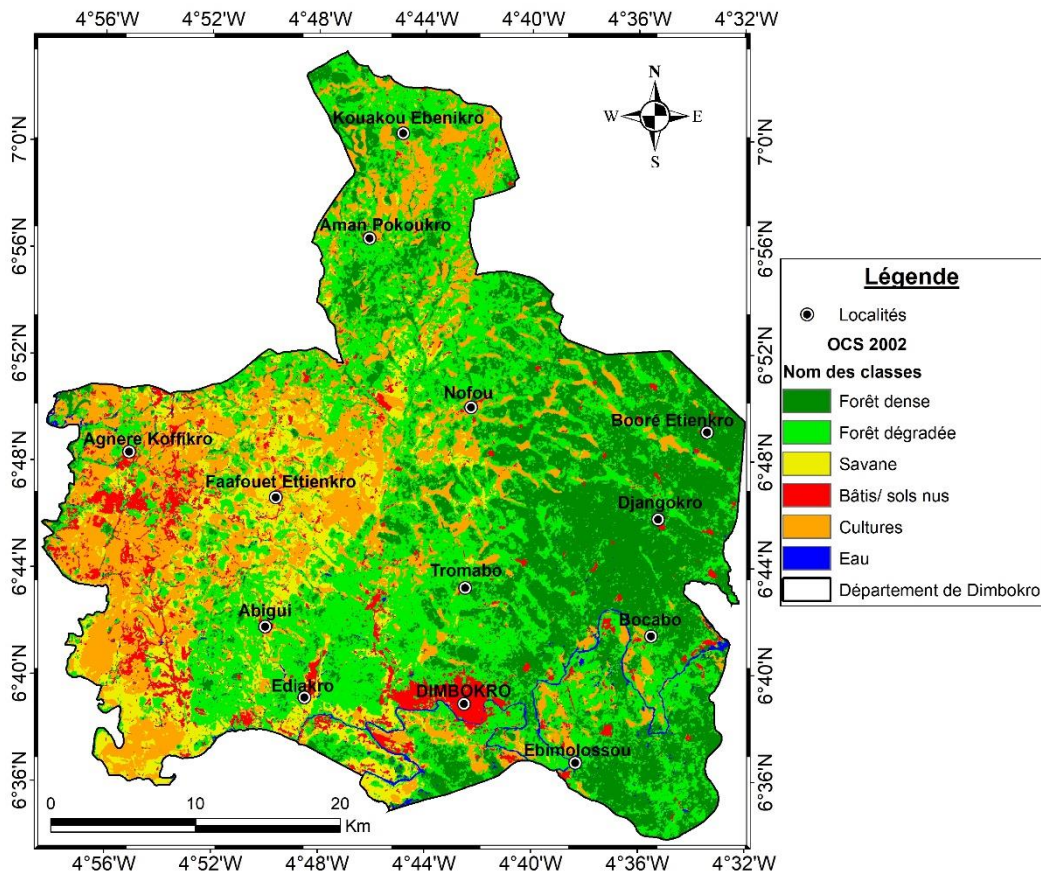


Fig. 3. Occupation du sol en 2002 à partir des images Landsat ETM+

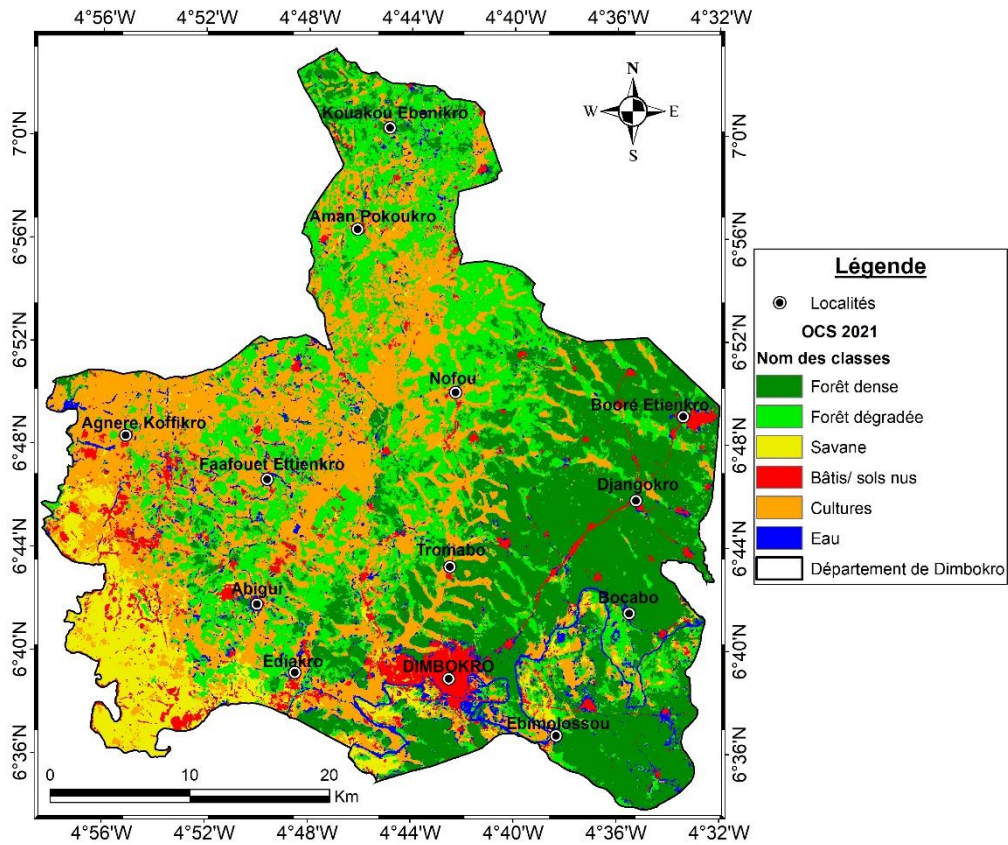


Fig. 4. Occupation du sol en 2021 à partir des images OLI

#### 4.2.2 ETAT DE L'OCCUPATION DU SOL DE 1988 À 2021

Les caractéristiques (superficie et pourcentage) des différentes unités d'occupation du sol sont consignées dans le Tableau 6.

**Tableau 6. Proportions des classes d'occupation du sol (superficies et pourcentage)**

Classes	Superficies					
	1988		2002		2021	
	%	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>
Forêt dense	22,04	336,55	12,18	185,99	8,23	125,67
Forêt dégradée	32,67	498,87	20,61	314,71	15,19	231,95
Savane	5,18	79,10	10,72	163,69	12,51	191,03
Bâti/sols nus	10,84	165,53	23,32	356,10	42,23	644,85
Cultures	26,41	403,28	30,85	471,08	20,18	308,15
Eau	2,86	43,67	2,32	35,43	1,66	25,50
Total	100	1527	100	1527	100	1527

L'analyse du Tableau 6 montre les proportions des unités d'occupation du sol de 1988 à 2021:

- En 1988, le paysage était dominé par les forêts dégradées (32,67 %) soit une superficie de 498,87 km<sup>2</sup> et successivement par la forêt dense (22,04 %), les cultures (26,41 %), les bâtis/sols nus (10,84 %), la savane (5,18 %) et l'eau (2,86 %)
- En 2002, on assiste à une prépondérance des cultures (30,85 %) soit 471,08 km<sup>2</sup> des bâtis/sols nus (23,32 %) soit 356,10 km<sup>2</sup> et des forêts dégradées (20,61 %) soit 314,71 km<sup>2</sup>
- En 2021, le département de Dimbokro était couvert en majeure partie par les classes bâtis/sols nus (42,23 %) représentant une superficie de 644,85 km<sup>2</sup> suivi par les cultures (20,18 %), les forêts dégradées (15,19 %) et les savanes 191,03 km<sup>2</sup> (12,51 %)

#### 4.2.3 ÉVALUATION DE L'ÉVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL

L'évolution de l'occupation du sol entre 1988 et 2021 est présentée dans le Tableau 7. Les valeurs positives des taux révèlent une augmentation des superficies tandis que les valeurs négatives indiquent que les superficies des unités d'occupation du sol ont régressé.

**Tableau 7. Taux d'évolution des classes d'occupation entre 1988 et 2021**

Classes	Superficies					
	1988 – 2002		2002 – 2021		1988 - 2021	
	Tc	Tg	Tc	Tg	Tc	Tg
Forêt dense	-4,24	-44,74	-2,06	-32,43	-2,99	-62,66
Forêt dégradée	-3,29	-36,91	-1,61	-26,30	-2,32	-53,50
Savane	5,20	106,95	0,81	16,70	2,67	141,51
Bâti/sols nus	5,47	115,13	3,13	81,09	4,12	289,58
Cultures	1,11	16,81	-2,23	-34,59	-0,82	-23,59
Eau	-1,49	-18,88	-1,76	-28,45	-1,65	-41,96

##### ○ Évolution entre 1988 et 2002

Les classes forêts denses, forêt dégradée et eau ont régressées par rapport à l'année 1988 respectivement de 44,74 %, 36,91 % et 18,88 % durant 14 ans à raison de 4,24 %, 3,29 % et 1,49 % par an (Fig. 5). Par ailleurs, contrairement aux classes précédentes les unités d'occupation du sol telles que les bâtis/sols nus, la savane et les cultures ont connus une augmentation des superficies pendant l'année 2002 respectivement de 5,47%, 5,2% et 1,11%.

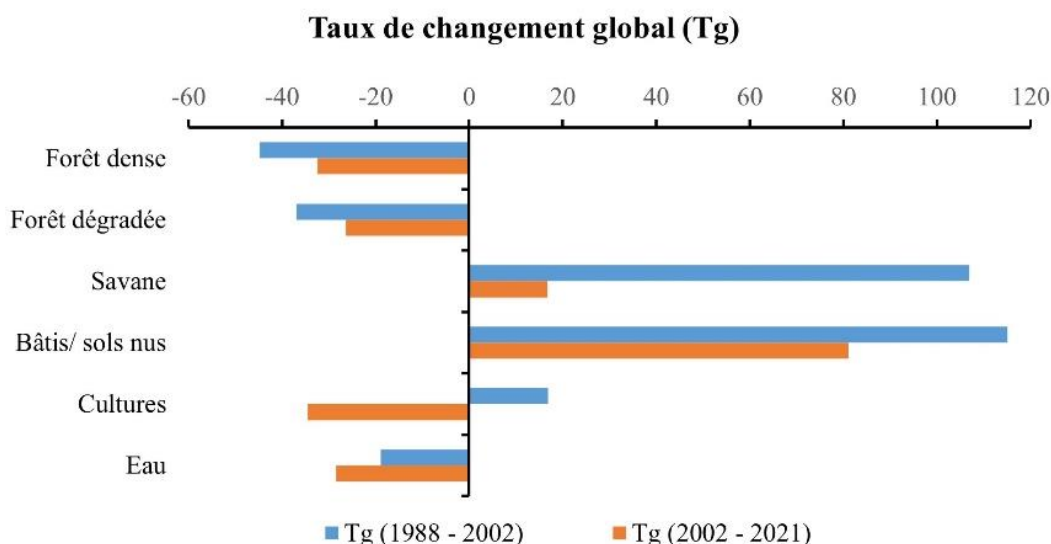
##### ○ Évolution entre 2002 et 2021

Entre 2002 et 2021, les plus grandes variations sont observées au niveau des classes cultures (-34,59 %), forêts denses (-32,43 %), eau (-28,45 %) et forêts dégradées (-26,30 %) qui ont connues des régressions à raison respectivement de 2,23%, 2,06%, 1,76% et 1,61%. À contrario, les classes bâtis/sols nus (3,13 %) et savane (0,81 %) ont connus une augmentation des superficies à l'année 2021 (Fig. 5).



### ○ Évolution entre 1988 et 2021

Sur la période d'étude (1988 à 2021), les formations forestières (forêts denses et dégradées) qui occupaient plus de la moitié de l'espace 54,71 % en 1988 sont passées à 23,42 % en 2021, soit une diminution de 62,66 % représentant une superficie de 357,62 km<sup>2</sup> (Tableau 7). Cette régression s'est faite au profit des bâtis/ sols nus dont la superficie est passée de 165,53 km<sup>2</sup> en 1988 à 644,85 km<sup>2</sup> en 2021. Avec un taux annuel de progression estimé à 4,12 % pour les bâtis/ sols nus et 2,67 % pour les savanes, la disparition des formations végétales naturelles a probablement entraîné l'augmentation des zones anthropisées. Quant à la classe eau, elle a connu une réduction de sa superficie passant de 43,67 km<sup>2</sup> à 25,5 km<sup>2</sup> avec un taux moyen de -1,65 %. Ces taux d'évolutions annuels se poursuivront si les conditions restent constantes c'est-à-dire l'intensification des activités d'orpaillage.



**Fig. 5. Synthèse de l'évolution spatiale des différentes unités d'occupation du sol entre 1988 et 2021**

### 4.3 DISCUSSION

La cartographie par télédétection des changements de l'occupation du sol à partir des images Landsat TM, ETM+ et OLI a permis de connaître le paysage qui couvre le département de Dimbokro de 1988 à 2021. La classification supervisée appliquée aux images satellitaires montre que les valeurs des précisions globales sont respectivement de 93,21 % pour l'image TM de 1988, de 94,64 % pour ETM+ et 97,88 % pour OLI 2022. Ces valeurs traduisent une bonne classification des images. Le coefficient de Kappa obtenu est de 0,91 pour 1988; 0,92 pour 2002 et 0,96 pour 2021. Ces résultats montrent que classification adoptée est valable car les résultats d'une analyse d'image dont la valeur de Kappa est supérieure à 0,50 sont bons et peuvent être judicieusement utilisés [28]. Les valeurs élevées de l'indice de kappa pour toutes les images (> 0,9) signifient que plus de 90 % des pixels des images ont été correctement classés conformément aux données de vérité-terrain. Selon [25], il y a un accord presque parfait entre les résultats cartographiques obtenus et la vérité sur le terrain si l'indice de Kappa est compris entre 0,81 et 1. De façon globale, les valeurs des différents indicateurs de précision de la classification supervisée obtenues pour les différentes images, traduisent d'une part, de la bonne qualité des échantillons et d'autre part, de la bonne correspondance entre le résultat de la classification et la réalité spatiale contenue dans les images. Les précisions cartographiques obtenues dans le département de Dimbokro sont en accord avec les travaux de certains auteurs qui ont obtenues des précisions globales comprises entre 88 % et 98 % [2], [3], [12], [21], [22], [29]. Malgré ces résultats satisfaisants, des confusions ont été notées, d'une part, entre la classe culture et savane, entre les cultures et les sols nus, et d'autre part, entre les forêts et les savanes.

Malgré ces résultats satisfaisants, certaines classes présentes des confusions qui sont inférieures à 10 %. En 1988, la savane se confond avec la forêt dégradée (2,17 %) et les cultures (3,19 %). Aussi, il y a une confusion entre les cultures et les forêts dégradées (2,4 %). Pour l'année 2002, la classe forêt dense est confondue avec la forêt dégradée (3,42 %) et la savane (2,65 %). Quant à 2021, il existe une confusion entre les cultures et les forêts dégradées (2,82 %). Ces confusions sont liées à la fois à la ressemblance du point de vue radiométrique, à la modification des pratiques culturelles et au développement des activités anthropiques [2]. Ces confusions sont acceptables dans la mesure où aucune de ces erreurs n'est au-dessus de 70 % [31].

De façon générale, la dynamique de l'occupation du sol de 1988 à 2021 montre une progression des classes savane (+2,67 %) passant de 79,10 km<sup>2</sup> à 191,03 km<sup>2</sup> et bâtis/sols nus (+4,12 %) qui passe de 10,84 km<sup>2</sup> à 644,85 km<sup>2</sup>. Cette évolution s'est faite au détriment des classes forêt dégradée (-2,99 %), forêt dense (-2,32 %), des cultures (-0,82 %) et eau (-1,65 %). Cette situation est due à l'action combinée de la baisse pluviométrique à l'instar des zones tropicales humides africaines depuis les années 1970 et aux activités anthropiques (feux de

brousse, exploitation abusive du bois, développement de l'orpaillage) dans la région [3], [30], [32]. De façon plus particulière, la réduction de la classe eau (-1,65 %) est liée trois principaux facteurs. D'abord la baisse de la pluviométrie entraînant la disparition de certains affluents du N'Zi, ensuite l'accroissement rapide de la population dont les besoins en eau entraînent des prélèvements de plus en plus intenses dans les retenues d'eau [2] et enfin, le développement et l'expansion des activités d'orpaillage [12]. En effet, le développement et l'intensification de l'orpaillage entraîne une augmentation de la population dans la zone tout en favorisant l'augmentation d'effets complémentaires de ceux de l'extraction minière (expansion agricole, multiplication des constructions, déforestation, la dégradation des sols et la perte de la biodiversité) [6], [12], [33], [34], [35].

## 5 CONCLUSION

À l'issue de cette étude diachronique sur les images satellitaires Landsat TM (1988), ETM+ (2002), et OLI (2021), il en ressort que le paysage du département de Dimbokro a considérablement changé. Les six classes identifiées durant cette étude sont la forêt dense, la forêt dégradée, la savane, les cultures, les bâtis/ sols nus et l'eau. La dynamique de l'occupation du sol de 1988 à 2021 met en évidence une tendance régressive ou progressive des différentes classes. Ainsi, sur cette période de 33 ans, on observe une régression des classes forêts denses (-2,99 %), forêts dégradées (-2,32 %), cultures (-0,82 %) et eau (-1,65 %) par contre les classes savanes (+2,67 %) et bâtis/ sols nus (+4,12 %) sont en évolution. Ces résultats montrent que les changements du paysage dans le département de Dimbokro sont liés à une forte anthropisation traduisant l'apparition des sites d'orpaillage.

## REFERENCES

- [1] J. Sandlos, and A. Keeling, «Environmental Justice Goes Underground? Historical Notes from Canada's Northern Mining Frontier», *Environmental Justice*, vol. 2, no 3, pp. 117–125, 2009.
- [2] N. M. R Fossou, «Variabilité de la pluviométrie et son incidence sur les ressources en eau, les écosystèmes environnementaux et modélisation hydrologique dans les départements de Bocanda et de Dimbokro (Centre-Est de la Côte d'Ivoire en Afrique de l'ouest), » Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 225 p, 2015.
- [3] A. M. Kouassi, «Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire». Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 234 p, 2007.
- [4] T. Ouattara, J-M. Dubois, et Q. H. J. Gwyn, «Méthode de cartographie de l'occupation des terres en milieu aride à l'aide de données multisources et de l'indice de végétation TSAVI», *Télédétection*, vol. 6, no. 4, pp. 291–304, 2006.
- [5] N. M. Ngom, M. Mbaye, D. Baratoux, L. Baratoux, T. Catry, N. Dessay, and Al, «Mapping artisanal and small-scale gold mining in Senegal using Sentinel 2 data», *GeoHealth*, vol. 4, 21 p, 2020.
- [6] S. S. Traore, S. Dembele, D. Dembele, N. Diakite, et C. H. Diakite, «Dynamique de l'occupation du sol et trajectoire du couvert végétal autour de trois sites miniers du Sud Mali entre 1988 et 2019, » *Physio-Géo*, vol. 17, pp. 151-166, 2022.
- [7] A. A. Saley, D. Baratoux, L. Baratoux, K. E. Ahoussi, K. A. Yao, and K. J. Kouame, «Evolution of the Koma Bangou Gold Panning Site (Niger) From 1984 to 2020 Using Landsat Imagery, » *Earth and Space Science*, vol. 8, 25 p, 2021.
- [8] B. A. Maïga, K. E. Kouadio, et O. Soumare, «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» *Afrique SCIENCE*, vol. 17, no. 3, pp. 28 – 39, 2020.
- [9] R. S. Lunetta, J. F. Knight, J. Ediriwickrema, J. G. Lyon, and L. D. Worthy, «Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data, » *Remote Sensing of Environment*, vol. 105, no. 2, pp. 142-154, 2006.
- [10] N. Käyhkö, N. Fagerholm, B. S. Asseid et A. J. Mzee, «Dynamic land use and land cover changes and their effect on forest resources in a coastal village of Matemwe, Zanzibar, Tanzania, » *Land Use Policy*, vol. 28, no. 1, pp. 26-37, 2011.
- [11] Environmental Law Alliance Worldwide (ELAW), «Guide pour l'évaluation des EIE de projets miniers». *Première édition*, 130 p. 2010.
- [12] K. S. A. Yao, «Apport de l'hydrochimie et de la géochimie environnementale dans l'évaluation des ressources en eau des environnements miniers du département de Divo (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire), » Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 293 p, 2022.
- [13] J. A. Griffith, S. V. Stehman, T. L. Sohl and 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*, vol. 24, pp.175 – 81, 1978.
- [14] Institut National de la Statistique (INS), «Données socio démographiques et économiques, » *Recensement Général de la Population et de l'Habitat, Région du N'Zi*, 2021.
- [15] B. D. Yao, I. Diaby, O. L. Nioule, Y. Kone, L. Zahiri et K. Lobognon, «Ministère des Mines. Notice explicative de la carte géologique feuille de M'Bahiakro 1/200000, » mémoire 2, 1990.
- [16] B. D. Yao, C. Délor, Y. Simeon, I. Diaby, G. Gadou, P. Kohou, A. Okou, S. Konaté et G. Konan, «Ministère des Mines et de l'Energie. Notice explicative de la carte géologique feuille de Dimbokro 1/200000, » mémoire. 6, 1995.
- [17] V. Monnier., *La végétation*, pp. 17-19. In P. Vennetier (Eds j.a.), *Atlas de la Côte d'Ivoire*, Paris, 72 p, 1978.
- [18] K. A. Yao, A. M. Kouassi, Y. B. Koffi, et J. Biemi, «Caractérisation hydrodynamique et hydrogéochimique des aquifères fissurés de la région de Toumodi (Centre de la Côte d'Ivoire),» *Journal of environmental hydrology*, vol. 18, pp. 455 – 470, 2010.

- [19] J. P. Donnay, «Les spartiocartes en composition colorée, » *Bulletin de la Société Géographique de Liège, Belgique*, pp. 43–61, 2000.
- [20] M C. Girard et C M. Girard «La télédétection appliquée, zones tropicales et intertropicales, » *Dunod, Ed. Paris*, 529 p, 1999.
- [21] T. D. Soro, B. D. Kouakou, E. A. Kouassi, G. Soro, A. M. Kouassi, K. E. Kouadio, M. O. S. Yei, et 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*, vol. 13, no. 3, 22 p, 2013.
- [22] G. Soro, E. K. Ahoussi, 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*, vol. 10, no. 3, pp. 146 – 160, 2017.
- [23] K. D. Kpedenou, O. Drabo, A. P. Ouoba, D. C. E. Da et 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*, vol.31, no. 55, pp. 203 – 228, 2017.
- [24] G. Skupinski, D. Binhran et C. Weber, «Les images satellites Spot multi-dates et la métrique spatiale dans l'étude du changement urbain et suburbain: le cas de la basse vallée de la Bruche (BasRhin, France), » *Cybergeog: European Journal of Geography*, article. 439, 2009.
- [25] S. Chalifoux, M. Nastev, C. Lamontagne, et R. Latifovic, «Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellitaire Landsat en hydrogéologie, » *Télédétection*, vol. 6, no. 1, pp. 9 – 17, 2006.
- [26] B. Bernier, «Introduction à la macroéconomie, » *Dunod, Paris*, 217 p.
- [27] Fao, Forest resources assessment. Survey of tropical forest cover and study of change processes, Forestry Paper, Roma, Ed 130, 1990.
- [28] Jr. R. G. Pontius, «Quantification error versus location error in comparison of categorical maps, » *Photogrammetric Engineering and remote sensing*, vol. 66, no. 8, pp. 1011- 1016, 2000.
- [29] Y. A. W. Noho, K. F. N'guessan et B. Z. Koli, «Caractérisation de la végétation du bassin versant du N'Zi (Côte d'Ivoire), » *Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, no. 1, pp. 31 – 42, 2018.
- [30] G. Soro, «Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraines dans la région des lacs (Centre de la Côte d'Ivoire): hydrogéologie et hydrochimie des aquifères discontinus du district de Yamoussoukro et du département de Tiebissou, » Thèse de Doctorat, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 250 p, 2010.
- [31] V. J. Mama et J. Oloukoj, «Evaluation de la précision des traitements analogiques des images satellitaires dans l'étude de la dynamique de l'occupation du sol, » *Télédétection*, vol. 3, no. 5, pp. 429 – 44, 2003.
- [32] K. E. N'guessan, «Étude de l'évolution de la végétation du « V Baoulé » (contact forêt/savane en Côte d'Ivoire) par télédétection, » *Télédétection sécheresse*. Ed. AUPELF-UREF, pp. 181-196, 1990.
- [33] J. Obodai, K. A. Adjei, S. N. Odai and M. Lumor, «Land use/land cover dynamics using Landsat data in a gold mining basin-the Ankobra, Ghana». *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 13, pp. 247-256, 2019.
- [34] M. A. Kamga, S. C. Nguemhe Fils, M. O. Ayodele, C.O. Olatubara, S. Nzali, A. Adenikinju et M. Khalifa, «Evaluation of land use/land cover changes due to gold mining activities from 1987 to 2017 using Landsat imagery, East Cameroon, ». *GeoJournal*, vol. 85, pp. 1097-1114, 2019.
- [35] Y. U. Sikuzani, S. Boisson, S. C. Kaleba, C. N. Khonde, F. Malaisse, Halleux Jm., Bogaert J. et F. M. Kankumbi, «Dynamique de l'occupation du sol autour des sites miniers le long du gradient urbain-rural de la ville de Lubumbashi, RD Congo, » *Biotechnologie Agronomie, Société et Environnement*, vol. 24, no. 1, pp. 1-14, 2020.