

FRAGMENTATION DU PAYSAGE NATUREL AU MALI : CAS DES SITES D'ORPAILLAGE DE LA PREFECTURE DE KANGABA

MAMA Adi ⁽¹⁾ ; ALASSANE Abdourazakou ^{(2)*} ; TRAORE F. Moussa ⁽³⁾ ; SINSIN A. Brice ⁽⁴⁾ ; BOGAERT Jan ⁽⁵⁾

(1) Université d'Abomey Calavi, Cotonou (Bénin)

(2) Université de Lomé (Togo)

(3) Organisation Non Gouvernementale ONG (Mali)

(4) Université d'Abomey Calavi, Cotonou (Bénin)

(5) Université de Liège (Belgique)

*Correspondant courriel : abdourazakou@yahoo.fr

Résumé

L'orpaillage est une activité qui fait vivre des millions de personnes dans le monde et en Afrique. Au Mali, cette activité est pratiquée par 4,000 à 50,000 mineurs dans trois districts aurifères dont celui de la préfecture de Kangaba. La présente étude a pour objectif d'attirer l'attention des décideurs sur les effets de l'orpaillage sur l'environnement. Spécifiquement, il s'agira de caractériser l'orpaillage et d'analyser ces effets sur le paysage naturel. Pour atteindre ces objectifs, des données socio-économiques à partir des entretiens non structurés ont été collectées. Elles ont été complétées par des traitements d'images Landsat (1985, 2010 et 2017) et des techniques d'écologie du paysage. Cette méthodologie a permis de comprendre que toutes les activités économiques de la préfecture tournent autour de l'orpaillage et détermine la dynamique paysagère des classes d'occupation du sol, les processus de transformation spatiale ainsi que le calcul des indices spatiaux.

Les techniques d'exploitation de l'or sont restées ancestrales tant dans la prospection que dans l'installation des sites. Le paysage de la préfecture a subi un changement, sans pour autant déstructurer la composition du paysage. En 32 ans, les classes de savanes restent toujours dominantes. Les différents indices calculés indiquent une anthropisation du paysage, qui a affecté les classes différemment. L'orpaillage a contribué à la fragmentation du paysage à travers les techniques utilisées.

Mots clés : Orpaillage, fragmentation, anthropisation, préfecture de Kangaba, Mali

Fragmentation of the natural landscape in the gold mining sites of Kangaba, Mali

Abstract

Gold mining is an activity that sustains millions of people around the world in general and in Africa in particular. In Mali, 4,000 to 50,000 miners work in three gold-bearing districts including the Kangaba Prefecture. This study purports to draw the attention of

decision-makers to the effects of gold-mining on environment. Specifically, it aims at characterizing gold mining and analyze its effects on the natural landscape. The methodology consisted of socio-economic data collection from the unstructured interviews. The interviews were supplemented by Landsat image processing (1985, 2010 and 2017) and landscape ecology techniques. The methodology made it possible to understand that all the prefecture's economic activities revolve around the gold mining. It also established the landscape dynamics of the land use classes, the spatial transformation processes and the calculation of spatial indices. Gold mining techniques have remained traditional in both prospecting and site setting. The landscape of the prefecture has undergone a change without reorganizing the composition of the landscape. In 32 years, savanna classes have remained dominant. The different indices calculated indicate an anthropization of the landscape that has affected the classes differently. Gold mining has contributed to the fragmentation of the landscape through the techniques used.

Keywords: Gold mining, fragmentation, anthropization, Kangaba prefecture, Mali

Introduction

La dégradation des paysages naturels est l'un des plus graves problèmes environnementaux contemporains. Elle peut être définie comme la perte de productivité biologique des terres (Soulama et al., 2015 ; FAO, 2008). Les écosystèmes savaniques d'Afrique connaissent des processus rapides de transformation des paysages et une dégradation des ressources naturelles (Larwamou et al., 2005 ; Mama et al., 2014). Jadis épargnées par le phénomène de perte des habitats en raison de la faible pression anthropique, la région de Koulikoro en zone soudanienne du Mali est désormais soumise à une dégradation environnementale. Les migrations interne et surtout externe de populations des pays voisins de la sous région ouest-africaine vers les paysages naturels favorables aux activités aurifères contribuent à accélérer la dégradation de ces derniers (Keita, 2001). C'est le cas dans la préfecture de Kangaba, située au Sud-ouest de Koulikoro au Mali qui abrite d'importants sites d'orpaillage, où divers rapports d'étude font cas d'énormes dégâts sur l'environnement et plus précisément sur la production agricole (ARM, 2014 ; DNGM, 2014). Aujourd'hui, les populations de la zone aurifère de Kangaba, s'inquiètent de l'accroissement de ces sites d'orpaillages, de la pression foncière incontrôlée, leurs conséquences sur l'environnement, de la santé humaine et de l'occurrence des conflits d'usage. Les changements d'occupation des sols sont souvent connus, mais c'est leur ampleur qui diffère selon le type de pressions et les conditions écologiques et environnementales. En effet, en Afrique subsaharienne plusieurs millions de personnes dépendent de l'exploitation de l'or. Selon, ARM, 2014, les mineurs sont estimés entre 4,000 à 50,000 hommes et femmes sur les différents sites d'exploitation. Le sous-sol malien a fait l'objet d'intenses activités d'exploitation d'or par des procédés

artisans et traditionnels. L'or est exploité au Mali de deux manières : l'exploitation industrielle et l'exploitation traditionnelle (artisanale) ou l'orpaillage. Concernant l'orpaillage, la production est estimée à 4 tonnes par an et représente 8,3% de la production totale de l'or au Mali, soit 1,2% de la branche extractive des minerais (DNGM, 2014). L'exploitation minière en général a un impact sur l'environnement, qui varie en fonction des conditions physiques du milieu, les méthodes utilisées et les minerais exploités. L'orpaillage fait subir à l'environnement de nombreux dégâts au nombre de ceux-ci nous avons la destruction du couvert végétal et des sols, la pollution des ressources en eau due de l'utilisation des produits chimiques. L'orpaillage par son caractère itinérant, le regroupement des milliers de personnes sur un site, les techniques et les outils utilisés engendrent parfois des processus d'érosion souvent irréversibles (DNGM, 2014). La destruction est aggravée par la recherche des pépites qui se trouvent souvent entre les racines de certains arbres. Au Mali, les problèmes environnementaux liés à l'orpaillage traditionnel sont « les chantiers orphelins » qui sont d'anciens sites abandonnés avec des excavas cachés souvent par l'eau et les végétations secondaires. Ces mines traditionnelles sont responsables de nombreux dégâts d'ordre écologique. La présente étude s'inscrit dans la dynamique de préservation de l'environnement. Au regard de l'engouement que suscite l'orpaillage et les conséquences sur l'environnement particulièrement sur la végétation, cette pratique nécessite un suivi écologique dans un écosystème fragilisé par les actions anthropiques tels que l'agriculture, l'élevage, l'exploitation des bois de chauffe, le charbon de bois et les effets négatifs des variations climatiques. Les études sur les dynamiques paysagères sont rarement mises en évidence dans cette zone du Mali, d'où l'absence de documents de suivi de la composition et de la configuration des taches constituant les unités d'occupation des sols au niveau local. La présente étude vise à combler cette insuffisance. Elle a pour objectif général d'attirer l'attention des autorités et des populations locales sur les effets néfastes du comportement des orpailleurs sur l'environnement en utilisant la géomatique et l'écologie du paysage. Les objectifs spécifiques étant de faire une cartographie des unités d'occupation du sol de la zone d'étude, de déterminer l'influence de l'orpaillage sur la structure spatiale et les processus de transformation spatiale et de caractériser l'orpaillage. Notre hypothèse étant que les modes d'organisation des activités aurifères avec des techniques et matériels utilisés par les orpailleurs conduisent à la fragmentation du paysage. La fragmentation est caractérisée par une diminution de la surface totale d'un habitat et son éclatement en fragments, ou plus simplement par une rupture de continuité (Burel et al., 2003).

1 - Matériel et méthodes

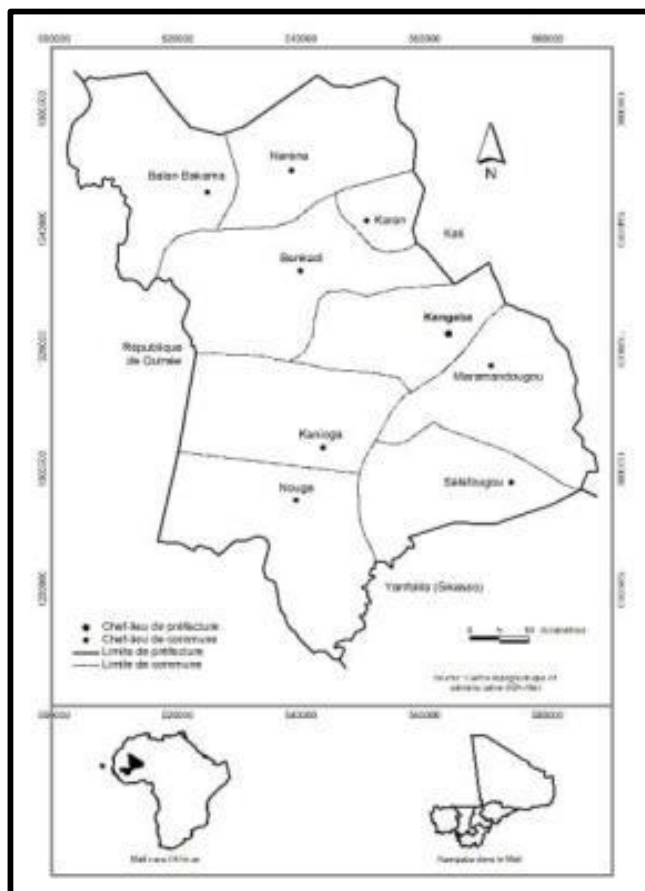
1.1 - Matériel

1.1.1 - Milieu d'étude

La préfecture de Kangaba est située au Sud-ouest de la région de Koulikoro entre 8° 27'31.87" et 8° 31'13.23" de latitude nord et entre 11°26'47.37" et 12°22'14.80" de longitude est. Elle couvre une superficie d'environ 5 165 km². Elle est limitée au Nord et à l'Est par la préfecture de Kati, au Sud par la préfecture de Yanfolila, et à l'Ouest par la république de Guinée. La préfecture de Kangaba compte neuf (09) Communes (Figure 1). Le relief est dominé par une pénéplaine avec des altitudes variant entre 350 m à 420 m. Les sommets de collines essentiellement tabulaires sont recouverts d'une cuirasse latéritique de 2 à 5 m d'épaisseur. Le climat est du type soudanais caractérisé par une saison des pluies de juin à octobre et une saison sèche de mars à mai. La végétation est dominée par les savanes (boisée, arborée et arbustive) et quelques îlots de forêts (denses, claires et galeries). Les sols appartiennent aux formations birrimiennes plissées et métamorphisées. Ces formations essentiellement clastiques et volcaniques sont traversées par de nombreuses intrusions granitoïdes synorogéniques, de petits amas granodioritiques dioritiques et granosyémitiques. Cette activité magmatique s'est accompagnée de manifestations hydrothermales ayant engendrée la mise en place de nombreux filons de quartz porteurs de la minéralisation aurifère sulfurée (DNGM, 1989). Sur le plan hydrologique, la préfecture est arrosée par le fleuve Niger et la rivière Sankarani (affluent du Niger) avec une multitude de mares. Ces cours d'eau sont exploités pour la recherche de l'or, l'exploitation du sable, du gravier, la pêche et l'irrigation.

La population de la préfecture de Kangaba est passée de 73 312 hbts en 1998 à 114 957 hbts en 2014 (DNGM, 2014). Selon les statistiques de la DNGM (2014), les mineurs sont estimés entre 20 000 à 50 000 personnes venues du Burkina Faso, de la Guinée, du Sénégal et du Nigéria. La population est majoritairement composée des groupes socioculturels Malinké, Bambara, Peuls, Sarakolés, et Dogons. L'économie locale est basée essentiellement sur l'agriculture, l'élevage, le commerce, la pêche, l'artisanat et l'orpaillage.

Figure 1. Localisation de la préfecture de Kangaba (Mali)



1.1.2 - Données satellitaires et auxiliaires

Un total de neuf (09) images de type Landsat ont été téléchargées directement sur le site de la NASA (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Il s'agit des images Landsat MSS (Multi Spectral Scanner) de 1985 (résolution 57 m), Landsat ETM+ 2010 (30 m de résolution) et Landsat 8 OLI/TIRS de 2017 avec des path : 200 Row 51, path : 199 Row : 52 et path : 200 Row : 52. Le récepteur GPS Garmin Map 62s a facilité la collecte des coordonnées géographiques pour les points de reconnaissance des zones d'entraînement et de validation des types d'occupation du sol après deux missions de terrain.

1.2 - Méthodes

1.2.1 - Technique de collecte de données socio-économiques

Un questionnaire semi-structuré a été administré aux orpailleurs et responsables de mines des différents sites visités de la préfecture de Kangaba. Les campements des orpailleurs ont aussi été visités pour examiner le niveau d'utilisation des bois pour la construction des huttes et le soutènement des puits. Au total, six (6) sites en activité (Koflatié, Naréna, Karan, Farabani et Balandougou) dans quatre (4) communes ont fait l'objet de visite. Dans

chaque commune, 10 personnes ont été interviewées. Les personnes enquêtées ont été choisies de façon aléatoire sur les sites d'orpaillage. La concentration et l'assiduité des orpailleurs aux différents travaux d'extraction ont permis de questionner au-delà des 40 personnes. Les questions sont relatives aux outils et techniques d'exploitation, les espèces végétales coupées, les produits chimiques utilisés.

1.2.2 - Analyse et traitements des images satellitaires

➤ **Prétraitement des images satellitaires**

L'ensemble de la préfecture de Kangaba a pu être couvert par des mosaïques de scènes Landsat. Des corrections radiométriques et atmosphériques ont été faites sur les différents canaux selon leurs degrés de perturbation. Des compositions colorées en fausse couleur correspondant aux trois périodes de l'étude ont été utilisées pour obtenir la meilleure visualisation des pixels de l'image (Mama et *al.*, 2014 ; Sarr, 2009). Ainsi, les canaux allant du visible au proche infra-rouge qui ont été utilisés dans l'ordre radiométriques 3-2-1 pour le capteur MSS, canaux 4-3-2 pour le capteur TM et canaux 5-4-3 pour les capteurs OLI TIRS, du fait des meilleures informations qu'ils apportent sur l'occupation des sols.

➤ **Classification numérique des images**

Une interprétation visuelle des différentes images en composition colorée fausse couleur et suivie de la projection des points correspondant aux unités d'occupation du sol (zone d'entraînement) ont permis d'identifier dix classes d'occupation (forêt galerie, forêt dense, forêt claire, savane boisée, savane arborée, savane arbustive, champs et jachères, sol nu, agglomérations, et plan d'eau). Ces classes d'occupation du sol ont été cartographiées sur chacune des images composites par une approche de classification supervisée avec l'algorithme du maximum de vraisemblance pour calculer la probabilité d'appartenance de chaque pixel à l'une des classes (Mass, 2000). Deux cents coordonnées géographiques prises directement sur les classifications supervisées et saisies dans le récepteur GPS Garmin 62s ont servi de base pour le contrôle sur le terrain et les entretiens avec les populations riveraines des sites d'orpaillage.

➤ **Evaluation de la performance des classifications**

La performance des trois classifications supervisées corrigées après le contrôle terrain a été estimée par le biais des matrices de confusion. Ainsi, les indices tels que : la précision globale (pourcentage de pixels correctement classés par rapport à ceux mal classés) et le coefficient de Kappa (rapport entre le nombre de pixels bien classés et le total de pixels sondés) ont été calculés (Skupinski et *al.*, 2009). Le coefficient de Kappa constitue pour les télédéTECTEURS une mesure fiable dans le processus de l'évaluation des classifications numériques des images satellitaires.

➤ **Post-classification des images**

La restitution cartographique des images traitées a permis de retenir 10 classes thématiques qui ont subi une vectorisation automatique des pixels pour des exploitations cartographiques dans un SIG. Trois cartes d'occupation du sol des années 1985, 2010 et 2017 ont été ainsi produites à partir des logiciels QGIS 3.8 et Arc GIS 10.3. Après le croisement de ces différentes cartes, une analyse statistique comparative du bilan d'évolution des trois états a été faite pour toutes les unités paysagères.

➤ **Evaluation de la structure paysagère**

L'analyse de la structure du paysage est importante pour mieux comprendre les rapports entre la configuration et le processus écologique qui s'y déroule dans le paysage (Mama, 2013). Ceci explique l'utilisation d'un certain nombre d'indices spatiaux (Bogaert et al., 2005) à partir des cartes d'occupation du sol des trois années d'étude en fichier matriciel et au format Ascii dans le pro logiciel Fragstat 4.3 (Mc Garigal et al., 1995). Ces indices sont choisis en fonction des différents processus écologiques à évaluer. Il s'agit de (i) le nombre de taches (l'augmentation du nombre de taches d'une classe peut être due à la fragmentation de cette classe), (ii) de l'aire totale des classes d'occupation du sol, (iii) du périmètre, (iv) de la dominance (proportion d'aires occupées par la tache dominante dans la classe et l'aire totale de la classe (McGarigal et al., 2002). Pour identifier les différents processus de transformation spatiale du paysage liés à l'orpaillage dans la transformation du paysage, l'arbre de décision de J. Bogaert et al., 2004 a été utilisé.

➤ **Traitements**

Le traitement des images s'est fait à l'aide du logiciel ENVI 4.5 qui a également servi à générer les tableaux des statistiques de l'occupation du sol.

2 - Resultats et discussion

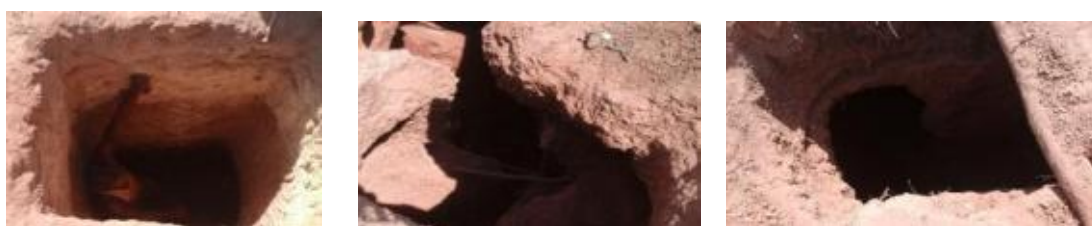
2.1 - Resultats

2.1.1 - Caractérisation de l'orpaillage et techniques de traitement de l'or

Les sites d'orpaillage résultent du processus de dégradation des gites primaires et de leur dépôt dans les sédiments meubles. Il existe principalement dans la préfecture de Kangaba, des sites alluvionnaires et éluvionnaires. Les sites alluvionnaires sont ceux où l'or est concentré au niveau des graviers à ciment argileux reposant directement sur le bed-rock. Leur exploitation consiste au grattage d'un tas de terre sur le site (opération appelée grattage) et de le tamiser avec l'espoir d'y découvrir l'or sous forme de pépite ou de poudre. Par contre, sur les sites éluvionnaires, l'or est concentré dans les éboulis anguleux et non classés de latérite, quartz, schistes et grès reposant sur un bed-rock altéré parsemé de filons et de filonnets de quartz. Ici, les orpailleurs creusent un puits à la recherche de

filon d'or qui conduit à des galeries. L'or est exploité sous les formes traditionnelles artisanales et mécanisées dans la préfecture. Plusieurs techniques sont utilisées pour parvenir à l'obtention de l'or. L'installation des puits se fait selon les traditions et les expériences acquises pendant des siècles. Tous (100%) reconnaissent faire des sacrifices pour solliciter la protection de leurs aïeux avant l'installation d'un puits. Ils ont souvent des profondeurs variant entre 10 et 15 mètres (photo 1) selon la nature du sol et des dizaines de galeries.

Photo 1 : Quelques puits en activités ; **Source :** Clichés Moussa, février 2015



Les galeries sont une partie intégrante des puits et sont inclinées. Elles se rencontrent sur des sols à carapace dure et constituent un continuum des puits. La méthode d'exploitation est « chambres et piliers » qui servent de soutènement restant inexploités. L'abatage irrationnel de ces piliers conduit souvent à l'effondrement des galeries. Pour exploiter ces puits galeries, on fait appel à l'utilisation massive du bois. Des centaines d'arbres sont ainsi abattus jusqu'à la souche comme nous le montre la photo 2. Pour la majorité d'entre eux (93%), l'abatage de ces arbres est involontaire et ne survient qu'en dernier ressort.

Photo 2. Quelques sites d'orpaillage en activité ; **Source :** Clichés Moussa, février 2015



2.1.2 - Organisation des Sites d'orpaillage

Les orpailleurs arrivent des villages, des villes et parfois des pays de la sous-région ouest africaine. Sur les sites visités, travaillent des sénégalais, guinéens, burkinabé, nigériens, ghanéens entre autres. Ces orpailleurs sont logés à proximité des sites dans des campements de fortune faits de plastique (47%), de bambous (23,9%) et de feuilles d'arbres (29,1%). Ces campements constituent un véritable danger pour l'environnement car, ils modifient le paysage et polluent avec les déchets liquides et solides qui sont jetés dans la nature. Un campement peut compter environ 1000 à 2000 personnes.

De l'extérieur, l'orpaillage apparaît comme une activité inorganisée. Il ressemble aux formes organisationnelles des structures villageoises, communautaires et familiales. D'après les interviewés (100%) l'orpaillage repose sur des règles et principes coutumiers qui sont acceptés de tous avant de s'y installer. Les violations de ces règles sont sanctionnées par des amendes. Sur les sites d'orpaillage, il existe quatre niveaux d'organisation du travail à savoir : le regroupement à l'échelon familial, le regroupement en Société anonyme, le regroupement en associations et les prestataires de services.

2.1.3 - Analyse de la structure spatiale

➤ Composition du paysage

Dans la préfecture de Kangaba, la savane boisée (SB) demeure toujours la classe dominante du paysage (47,7% en 1985 ; 39,8% en 2010 ; 73,1% en 2017). Quant aux forêts (FG, FD et FC), elles ne représentent que 11% de la superficie totale de Kangaba en 2017, soit un taux de régression de 5,3% entre 1985 et 2017. Parallèlement, à cette réduction de la couverture forestière, les agglomérations ont augmenté de 1% en 1985, 1,6% en 2010 et de 3% en 2017. La mosaïque de champs et jachères (CJ) qui devrait s'accroître en fonction de la démographie est représentée sous forme de petites tailles sur l'ensemble du paysage traduisant ainsi l'aspect d'une agriculture de type familiale. Leurs superficies passent de 14,7% à 9,8% en 32 ans (tableau 1).

Gridcode	1985			2010			2017					
	n ₁₉₈₅	a ₁₉₈₅ (ha)	p ₁₉₈₅ (%)	n ₂₀₁₀	a ₂₀₁₀ (ha)	p ₂₀₁₀ (%)	n ₂₀₁₇	a ₂₀₁₇ (ha)	p ₂₀₁₇ (%)			
SN	12630	8327	1,7	3850	5253	2592	0,5	1417	841	514	0,1	261
FG	14581	28149	5,8	7568	22022	15464	3,2	6770	31595	11894	2,4	7844
FD	2006	348	0,1	327	15335	10010	2,1	5451	7022	2928	0,6	1798
FC	17087	50623	10,4	11606	13616	20640	4,2	6609	54070	38894	8,0	18468
SB	11072	231959	47,7	21161	20827	193227	39,8	19467	45162	355084	73,1	41747
SA	18465	46919	9,7	1157	4954	150027	30,9	15237	4085	2373	0,5	1225
Sar	12353	36629	7,5	7753	7478	21449	4,4	4927	9185	7810	1,6	3238
CJ	29276	71457	14,7	20024	18661	57490	11,8	13504	39962	47449	9,8	17545
AG	11438	4866	1,0	2904	3405	7959	1,6	783	33009	14456	3,0	8528
CE	1933	6585	1,4	1178	2655	7004	1,4	1122	5662	4462	0,9	1760
Total	130841	485862	100	77528	114206	485862	100	75287	230593	485862	100	102414

Légende : SN = Sol nu ; FG = Forêt galerie ; FD = Forêt dense ; FC = Forêt claire ; SB = Savane boisée ; SA = Savane arborée ; Sar = Savane arbustive ; CJ = Champs et jachères ; AG = Agglomération ; CE = Cours d'eau.

Tableau 1 : Nombre de taches (n), aire totale (a en ha) et périmètre (p en km) des classes d'occupation du sol en 1985, 2010 et 2017

➤ Dynamique structurale du paysage

Les FG et FC ont connu un accroissement du nombre de tache suivi d'une diminution des aires de 1985 à 2017 comme nous l'a montré le Tableau 1 ci-dessus. Le processus de transformation spatiale dominant observé durant cette période a été la fragmentation. La classe de savane boisée (SB) pendant toute la période de l'étude a connu un processus de création par une multiplication du nombre de taches et de superficies. Par contre, les SA et Sar ont indiqué une réduction du nombre et d'aires des taches, donc un phénomène de suppression. Dans le détail, entre 1985 et 2010, le processus de transformation spatiale du paysage (Tableau 2) dominant reste la suppression des taches à l'échelle des classes d'occupation du sol (SN, FC, Sar, CJ). Toutefois, les classes de FG, de SB d'une part et les classes de SA et de AG d'autre part ont connu respectivement les phénomènes de dissection et d'agrégation. Cependant, dans les FD et CE, le processus en vigueur demeure la création de nouvelles taches. Ainsi, l'analyse des différents processus observés dans la préfecture montre que la suppression est la plus observée, ce qui illustre une anthropisation du paysage due aux activités humaines.

Gridcode	Différents scénarii			Processus
SN	$n_0 > n_1$	$a_0 > a_1$	$P_0 > P_1$	Suppression
FG	$n_0 < n_1$	$a_0 < a_1$	$P_0 < p_1$	Dissection
FD	$n_0 < n_1$	$a_0 < a_1$	$P_0 < p_1$	Création
FC	$n_0 < n_1$	$t_{obs} = a_1/a_0$	$t_{obs} < t$	Suppression
SB	$n_0 < n_1$	$a_0 > a_1$	$t_{obs} > t$	Dissection
SA	$n_0 > n_1$	$a_0 < a_1$	$P_0 < p_1$	Agrégation
Sar	$n_0 > n_1$	$a_0 > a_1$	$P_0 > P_1$	Suppression
CJ	$n_0 > n_1$	$a_0 > a_1$	$P_0 > P_1$	Suppression
AG	$n_0 > n_1$	$a_1 < a_0$	$P_0 > P_1$	Agrégation
CE	$n_0 < n_1$	$a_0 < a_1$	$P_0 > P_1$	Création

Légende : n_0 et n_1 = nombre de taches en 1985 et 2010 ; a_0 et a_1 = aire des taches en 1985 et 2010 ; P_0 et P_1 = périmètres des taches en 1985 et 2010.

Tableau 2 : Identification des processus de transformation spatiale entre 1985 et 2010

Entre 2010 et 2017, deux processus de transformation majeurs de même nature ont été observés. Il s'agit de la fragmentation des classes FG et Sar et la dissection des FD, FC, CJ et CE (Tableau 3). Le scénario mis en évidence a été la création de nouvelles taches dans les classes de SB et de AG. Pour les SA et SN, le nombre de taches et l'aire des taches ont diminué, par conséquent le processus de transformation en jeu est la suppression.

Gridcode	Différents scénarii			Processus
SN	$n_1 > n_2$	$a_1 > a_2$	$P_1 > P_2$	Suppression
FG	$n_1 < n_2$	$a_1 > a_2$	$p_1 < p_2$	Fragmentation
FD	$n_1 < n_2$	$a_1 > a_2$	$t_{obs} > t$	Dissection
FC	$n_1 < n_2$	$t_{obs} = a_2/a_1$	$t_{obs} > t$	Dissection
SB	$n_1 < n_2$	$a_1 < a_2$	$p_1 < p_2$	Création
SA	$n_1 > n_2$	$a_1 > a_2$	$P_1 > P_2$	Suppression
Sar	$n_1 < n_2$	$a_1 > a_2$	$t_{obs} < t$	Fragmentation
CJ	$n_1 < n_2$	$a_1 > a_2$	$t_{obs} > t$	Dissection
AG	$n_1 < n_2$	$a_1 < a_2$	$P_1 > P_2$	Création
CE	$n_1 < n_2$	$a_1 > a_1$	$p_1 < p_2$	Dissection

Légende : n_1 et n_2 = nombre de taches en 2010 et 2017 ; a_1 et a_2 = aire des taches en 2010 et 2017 ; P_1 et P_2 = périmètres des taches en 2010 et 2017.

Tableau 3 : Identification des processus de transformation spatiale entre 2010 et 2017

A l'échelle des classes d'occupation du sol entre 1985 et 2017, le processus de transformation global de fragmentation est observé (Tableau 4). Ce phénomène est suivi de la création de nombreuses taches au niveau des classes de FD, SB, AG et CE. Au niveau des SN et des SA, le nombre de taches a diminué en 2017 comparé à 1985 et les aires n'ont pas augmenté. Cela signifie que le processus de transformation a été la suppression des taches.

Gridcode	Différents scénarii			Processus
SN	$n_0 > n_3$	$a_0 > a_3$	$P_0 > P_3$	Suppression
FG	$n_0 < n_3$	$a_0 > a_3$	$P_0 < p_3$	Fragmentation
FD	$n_0 < n_3$	$a_0 < a_3$	$P_0 < p_3$	Création
FC	$n_0 < n_3$	$t_{obs} = a_3/a_0$	$t_{obs} > t$	Dissection
SB	$n_0 < n_3$	$a_0 < a_3$	$P_0 < p_3$	Création
SA	$n_0 > n_3$	$a_0 > a_3$	$P_0 > P_3$	Suppression
Sar	$n_0 < n_3$	$a_0 > a_3$	$t_{obs} < t$	Fragmentation
CJ	$n_0 < n_3$	$a_0 > a_3$	$t_{obs} > t$	Dissection
AG	$n_0 < n_3$	$a_0 < a_3$	$P_0 < p_3$	Création
CE	$n_0 < n_3$	$a_0 > a_3$	$P_0 < p_3$	Création

Légende : n_0 et n_3 = nombre de taches en 1985 et 2017 ; a_0 et a_3 = aire des taches en 1985 et 2017 ; P_0 et P_3 = périmètres des taches en 1985 et 2017.

Tableau 4 : Identification des processus de transformation spatiale entre 1985 et 2017

➤ Indices de Transformation spatiale

Les différents indices calculés de structure spatiale dans les classes d'occupation entre 1985 et 2010 sont résumés dans les tableaux 5, 6 et 7. Ces indices ont permis d'identifier entre 1985, 2010 et 2017 des changements dans la structure spatiale de la préfecture de Kangaba. Ainsi, entre 1985 et 2010, le nombre total de taches a diminué d'une manière générale passant de 130841 en 1985 à 114206 en 2010. Les plus fortes diminutions ont été observées au niveau des classes Sar et SN et la plus forte augmentation observée au

niveau de la FG. La suppression de taches renseigne sur le degré de fragmentation. Les causes de cette fragmentation sont généralement d'ordre anthropique et entraînent très souvent une perte d'habitats. Quant aux aires totales de la classe des SA, elles ont augmenté de 469,2 km² en 1985 passant à 1500,3 km² en 2010 et, pour ce qui est des autres classes, elles ont subi une diminution des aires. Les plus fortes diminutions ont été observées dans les classes FG et FC durant la même période.

Gridcode	Nombre de taches (n₀)	Aire totale (km²)	D_j(a) (%)	IF
SN	12630	83,3	13	12
FG	14581	281,5	40	13
FD	2006	3,5	25	5
FC	17087	506,2	70	15
SB	11072	2319,6	8	12
SA	18465	469,2	41	2
Sar	12353	366,3	76	11
CJ	29276	714,6	20	21
AG	11438	48,7	5	12
CE	1933	65,9	56	4
Total	130841	4858,6		

Tableau 5 : Indices de transformation spatiale en 1985

A l'analyse de l'indice de dominance (D_j(a)), une diminution des valeurs dans toutes les classes d'occupation a été constatée sauf la classe FC qui a augmenté de valeur. La classe SA est passée de 41% en 1985 à 1% en 2010. La Sar de 70% en 1985, à 0 en 2010. La FG de 40% en 1985 à 13% en 2010. La diminution de D_j(a) est l'expression de la fragmentation des classes et un morçèlement des taches. Le paysage de Kangaba a connu une fragmentation et le morçèlement des taches. L'évolution des valeurs de l'indice de forme (IF) révèle souvent une anthropisation du paysage ; ainsi, l'analyse des tableaux 5 et 6, permet de constater que les valeurs de IF ont augmenté pour les classes FG, FD, SB, SA sauf pour FC. La non diminution de l'IF des classes naturelles peut être interprétée comme un maintien de la complexité des formes des taches, par conséquent le paysage est moins perturbé.

Gridcode	Nombre de taches (n₁)	Aire totale (km²)	D_j(a) (%)	IF
SN	5253	25,9	20	8
FG	22022	154,6	13	16
FD	15335	100,1	19	6
FC	13616	206,4	73	14
SB	20827	1932,3	2	13
SA	4954	1500,3	1	12
Sar	7478	214,5	0	11
CJ	18661	574,9	0	18
AG	3405	79,59	4	2
CE	2655	70,0	1	4
Total	114206	4858,6		

Tableau 6 : Indices de transformation spatiale en 2010

Entre 2010 et 2017, le nombre total de taches a augmenté d'une manière générale allant de 114206 (Tableau 6) en 2010 à 230593 (Tableau 7) en 2017. Les plus fortes augmentations ont été observées au niveau des classes FC, SB et AG. La multiplication du nombre de taches indique un phénomène de création de ces types d'occupation du sol. Les aires des classes SN, FG, FD, SA, Sar et CJ ont fortement baissé, par contre celles des FC, SB ont augmenté.

Gridcode	Nombre de taches (n₂)	Aire totale (km²)	D_j(a) (%)	IF
SN	841	5,1	10	3
FG	31595	118,9	2	20
FD	7022	29,3	4	9
FC	54070	388,9	2	26
SB	45162	3550,8	56	20
SA	4085	23,7	6	7
Sar	9185	78,1	4	10
CJ	39962	474,5	2	23
AG	33009	144,6	2	20
CE	5662	44,6	35	7
Total	230593	4858,6		

Tableau 7 : Indices de transformation spatiale en 2017

Le morcellement des taches des classes FG, FD, FC et SN s'est accentué avec la baisse des valeurs de l'indice de dominance entre les deux périodes. Pour les classes, SB, SA et Sar, les valeurs de l'indice de dominance ont augmenté. Une anthropisation du paysage naturel a été remarquée à travers l'évolution positive de valeurs de l'indice de forme (IF) en l'occurrence au sein des classes FG, FD, FC et SB.

2.2 - Discussion

2.2.1 - Résolution spatiale des images satellitaires

A l'échelle du paysage, les images satellitaires de type Landsat avec des pixels de 30m x 30m permettent de cartographier les types d'occupation du sol et de quantifier les différents indices conduisant à la prise de bonnes décisions dans l'aménagement du territoire (Mama, 2013 ; Gond & Brognoli, 2005). Cependant, la dimension spatiale des sites d'orpaillage ne peut être cartographiée et suivie par les images Landsat gratuites fournies par la NASA. La non utilisation des images Radar, des photographies aériennes idéales pour le suivi spatial d'une telle étude, constitue une lacune pour cette étude. Le coût financier est énorme pour l'acquisition de plusieurs images de haute résolution pour couvrir l'étendue de la zone d'étude bien que le secteur de l'orpaillage produit 10 tonnes d'or par an. La tonne d'or est vendue à 24 milliards de FCFA. Donc les 10 tonnes produites par les orpailleurs font rentrer 240 milliards de FCFA dans l'économie malienne selon les enquêtes réalisées sur le terrain en 2015. Comparativement au Mali où la cartographie des sites d'orpaillage n'est pas programmée dans le plan d'aménagement durable du territoire, Gond & Brognoli, 2005 en Guyane française ont pu mettre en place une technique qui a fait appel à l'utilisation de l'imagerie satellitaire optique. En effet, grâce à cette étude l'Etat manifeste désormais sa volonté de règlementer et de contrôler l'orpaillage à partir de la télédétection aérospatiale pour quantifier jusqu'à dans des milieux inaccessibles tous les phénomènes liés à cette activité aurifère. Cette activité en réalité fait apparaître des phénomènes telles que la turbidité des eaux chargées de boues et de matériaux polluants (Gond & Brognoli, 2005), des trouées dans la canopée sous forme de chapelets le long des rivières qui sont repérables sur des images satellitaires de hautes résolutions spatiales.

2.2.2 Analyse du processus de transformation spatiale

Le phénomène de suppression des taches d'occupation du sol dans le paysage de la préfecture de Kangaba à partir de la cartographie et du calcul de certains indices spatiaux est dû aux perturbations induites par les activités socioéconomiques d'orpaillage. En effet, l'installation des orpailleurs laisse cours à toutes sortes de coupes de bois sans tenir compte de la fragilité des écosystèmes naturels et des conséquences environnementales. Le soutènement des puits galeries pour augmenter la longévité des puits aggrave ce phénomène de coupe de bois contribuant ainsi à une modification dans la composition et dans la configuration spatiale. Les variations des valeurs des classes d'occupation du sol et des différents indices calculés illustrent bien une fragmentation et une dissection qui ont pour effet négatif la perte d'habitats naturels. Dans le paysage de Kangaba, l'augmentation du nombre de taches, de la densité de certaines tâches, la diminution des

valeurs de l'aire moyenne entre 1985 et 2017 indique un processus de fragmentation (Mama, 2013 ; Niculae & Patroescu, 2011) due à l'extension des activités d'orpaillage. En effet, les humains à travers leurs différentes activités socio-économiques modifient la structure spatiale des taches naturelles par la création des taches anthropiques (Mama et al., 2014). Le même constat a été fait dans d'autres pays d'Afrique, notamment en République Démocratique du Congo (RDC) à partir d'une étude réalisée dans le Kantaga par Djibu et al., (2008). Ces auteurs ont montré que la déforestation dans la province du Katanga a conduit au morcellement de la forêt dense en fragments beaucoup plus petits, isolés et vulnérables aux conditions extérieures. Ces derniers concluent qu'il existe une forte anthropisation liée principalement aux activités minières et agricoles.

2.2.3 - Conséquence écologique

Au Mali, les sites d'orpaillages font d'énormes dégâts sur le couvert végétal, les ressources en eau et le sol avec un impact direct sur les activités agricoles. Aujourd'hui, les populations de la zone aurifère de Kangaba s'inquiètent de l'accroissement des sites d'orpaillages et de leurs conséquences. Difficile cependant d'encourager une telle activité une fois sur le terrain. Trous creusés et abandonnés par-ci, villages fantômes par-là : la dégradation avancée de l'écosystème, des occupations anarchiques un peu partout sont les stigmates de l'orpaillage qui déforment le milieu naturel de cette portion du territoire. La situation est très complexe sur ce site où certains orpailleurs affirment gagner 10 grammes d'or de bénéfice par mois.

Les dragues sont utilisées pour l'exploitation de l'or principalement dans le lit du fleuve Niger. Les cyanures et le mercure déversés par les orpailleurs dans l'eau ont des effets collatéraux. Cette observation est similaire à celle faite par Carmouze et al. (2013) dans leur étude sur l'exposition des groupes socio-économiques liés aux activités d'orpaillage dans les régions amazoniennes où les populations étaient exposées à l'inhalation des vapeurs du mercure. En effet, la quantité de vapeurs de mercure pénétrant par voies cutanées est estimée à 2,6% de celle provenant de la respiration d'air contaminé (Morgan et al., 2006 ; Beliles, 1994). Donc, les populations vivant aux périphéries des sources d'émission comme celles habitant le long du fleuve Niger au Mali sont exposées dans la mesure où elles respirent un air riche en vapeurs de mercure comme l'a montré Lacerda, (1995). Cette exposition à la toxicité du mercure est dangereuse pour la santé des familles des orpailleurs. Pour Goldman & Shannon (2001), le mercure est une toxine environnementale omniprésente qui provoque un large éventail d'effets néfastes sur la santé humaine par inhalation ou ingestion. Des études récentes selon Polidori et al. (2013) in, Le mercure en Amazonie, portant sur le cycle biogéochimique du mercure en Guyane française ont démontré le rôle aggravant de l'orpaillage par des rejets supplémentaires de mercure métallique et de l'érosion de certains sols qui favorise la mobilisation et le

transport du mercure métallique jusqu'aux points les plus bas des cours d'eau. Les résultats obtenus à partir des différentes analyses confirment les hypothèses selon lesquelles l'orpaillage a de l'influence négative sur la végétation par la destruction de celle-ci. Aujourd'hui, la plupart des zones orpaillées se caractérisent par une disparition presque totale la végétation comme l'a montré Alassane (2019) dans son étude sur l'impact de l'orpaillage dans l'est de la préfecture de Tchaoudjo au Togo. Pour la construction d'un abri de 9 m², il faut en moyenne 8 troncs d'arbres d'environ 2 m de hauteur et 5 cm à 15 cm de diamètre. Pour cela, le critère de sélection pour une espèce utilisée est d'être résistante et ne pas être fruitière. Les tiges coupées sont associées à l'espèce *Oxytemanthera abyssinica* (bambous) servant d'armature et si l'espèce n'existe pas dans la zone elle est remplacée par d'autres. Ces orpailleurs arrivent avec des techniques d'exploitation différente parmi lesquelles l'utilisation du bois qui détruit le plus le couvert végétal. Les techniques et les outils utilisés par les orpailleurs détruisent environ 2 ha par site, cela est une perte énorme dans un paysage dominé par la savane où la densité moyenne est d'environ 355 tiges/ ha (Sokpon et *al.*, 2006 ; Keita et *al.*, 2012) ont démontré que les impacts majeurs de l'exploitation minière se résument à la perte de la végétation naturelle et de l'habitat de la faune, de la pollution des ressources hydriques. En République Démographique du Congo (RDC), Shutcha et *al.*, (2018) ont démontré à partir d'une synthèse sur les recherches menées depuis 2005 proposer une cartographie du fond pédogéochimique naturel comme base d'estimation des contaminations d'origine anthropique par les activités minières. Selon ces auteurs, en dehors de la toxicité du mercure remarquée dans les eaux et du sol à Kangaba au Mali, d'autres contaminants comme les Cu, Co, Pb et Zn existent dans des profils de sol avec des teneurs de fond respectives de 400, 50, 120 et 200 mg.kg⁻¹. En effet, la distribution spatiale des contaminants est conditionnée par la localisation des sources anthropiques de contamination, mais également par les redistributions localement importantes en surface dues à l'érosion, comme en témoigne l'analyse des sédiments des cours d'eau.

Conclusion

L'orpaillage est une activité séculaire dont dépendent de milliers de personnes Mali et particulièrement dans la préfecture de Kangaba. Sa production annuelle est évaluée à plusieurs tonnes bien que sa pratique actuelle soit source de nombreuses difficultés face à la grande ruée des populations vers cette activité. Cette ruée s'explique par la pauvreté généralisée dans le pays et par l'envolée du cours mondial de l'or. En dépit de son caractère économique, il échappe au contrôle de l'Etat. La pratique de l'orpaillage est aujourd'hui source d'un certain nombre de problèmes parmi lesquels la destruction de l'environnement.

L'orpillage, dans sa forme actuelle suscite beaucoup d'interrogation. Ces problèmes sont entre autres l'envahissement des sites des sociétés minières légales, le travail des enfants, l'hygiène et l'insécurité sur les sites. Des actions concrètes doivent être menées dans la mise en place d'un système d'observation et de suivi des ressources naturelles. Ces actions pourraient permettre un inventaire exhaustif des sites. Il est souhaitable d'élaborer une base de données actuelles des sites, de caractériser les concessions aurifères mais également de voir comment révégétaliser les sites abandonnés qui constituent de véritable danger aussi bien pour les hommes que pour les animaux.

References bibliographiques

- Alassane A., 2019 - Impact de l'orpillage sur l'élevage bovin dans l'est de la Préfecture de Tchaoudjo au Togo. In *Revue de Géographie du Laboratoire Leïdi*, ISSN, 0851-2515, Université Gaston Berger, Sénégal, pp. 10-28.
- Association des Régions du Mali, 2014 - Rapport d'étude des sites d'orpillage dans le cercle de Keniéba, région de Kayes, 20 pages.
- Beliles R. P. P., 1994 - The metals. In *Patty's Industrial Hygiene and Toxicology*, fourth edition volume 2, Part C. (Ed. by Clayton, G.D., and Clayton, F. E. John Wiley & Sons), pp. 2106- 2124.
- Bogaert J. & Mahamane A., 2005 - Ecologie du paysage : cibler la configuration et l'échelle spatiale. In *Annale des sciences agronomiques du Bénin*, 7, pp. 39-68.
- Burel F., Baudry J., 2003, *Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications*. Editions Tec & Doc, Paris, France, 359 pages.
- Carmouze J.-P., Lucotte M., Boudou A., 2013 - Le mercure en Amazonie. Rôle de l'homme et de l'environnement, risques sanitaires, Editions IRD, 494 pages.
- Direction Nationale de la Géologie et des Mines, 1989 - Rapport d'étude sur l'exploitation artisanale de l'or au Mali, 57 pages.
- Direction Nationale de Géologie et des Mines, 2014 - Rapport du Forum sur l'orpillage au Mali, 20 pages.
- FAO, 2008 - La dégradation des sols s'intensifie. www.FAO.Org du 4 août 2010.
- Goldman L. R. & Shannon M. W., 2001 - Technical report mercury in environment: implication for pediatrians. In *Pediatrians*, 108 (1), pp. 197-205.
- Gond V. ; Brognoli C., 2005 - Télédétection et aménagement du territoire : localisation et identification des sites d'orpillage en Guyane française. In *Bois et forêts des Tropiques*, 286 (4), pp. 5-13.
- Kabulu D. J., Bamba I., Munyemba K. F., Defourny P., Vancutsem C., Nyembwe N. S., Luhembwe M. N., & Bogaert J., 2008 - Analyse de la structure spatiale des forêts au Katanga. In *Ann. Fac. Sc. Agro.*, 1(2), pp. 12-18.
- Keita S., 2001 - Etude sur les Mines Artisanales et Les Exploitations Minières à Petite Echelle au Mali, 54 pages.
- Lacerda L. D., Malm O., Guimarães J. R. D., 1995 - Mercury and the newgold rush in the south. In *Biogeodynamics of pollutants in soil and sediments: risk assessment of delayed and non-near response* (Salomons W., Stiglian W.M., ed), Berlin, Springer-Verlag, pp. 213-245.

- Larwanou M., Saadou M. & Nonguierma A., 2005 - Détermination du degré d'aridité bioclimatique de sept localités du département de Tillabéri (sud-ouest du Niger) : classement en zones bioclimatiques. In *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 16 (2), pp.107-114.
- McGarigal K. & Cushman A. Samuel, 2002 - Comparative evaluation of experimental approaches to the study of habitat fragmentation effects. In *Ecological Applications*, 12, pp. 335-345.
- Mama A., 2013 - Anthropisation des paysages au Bénin : dynamique, fragmentation et développement agricole. Thèse de Doctorat, Université Libre de Bruxelles, Belgique, 198 pages.
- Mama A., Bamba I., Sinsin A. B., Bogaert J., De Canniere C., 2014 - Déforestation, savanisation et développement agricole des paysages des savanes-forêts dans la zone soudano-guinéenne du Bénin. In *Bois et forêts des Tropiques*, 322, pp. 65-75.
- Morgan D. L., Price H. C., Fernando R., Chand A S. M, O'connoer R. W., Barone S. S., Herr D. W. & Beliles R. P., 2006 - Gestational Mercury Vapor Exposure and Diet Contribute to mercury accumulation in Neonatal rats. In *Environmental Health Perspectives*, 114 (5), pp. 735-739.
- Niculae M. I. & Patroescu M., 2011 - Quantify forest ecosystems fragmentation in the subcarpathians between the Ramnicu Sarat and Buzau valleys, Romania, using landscape metrics. In *Biological Conservation*, 143, pp. 187-194.
- Polidori L., Fotsing J.-M. & Orru J.-F., 2013 - Déforestation et orpaillage : apport de la télédétection pour la surveillance de l'occupation du sol en Guyane française. In *Le Mercure en Amazonie*. Editions IRD, pp. 474-494.
- Sarr M. A., 2009 - Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat, Cypergeo. In *European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, DOI : 104000/cypergeo. 22707.
- Skupinski G., Don B. & Weber C., 2009 - 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 Bruche (Bas-Rhin). In *European Journal of Geography*, 439, pp. 1-20.
- Shutchu M. N., Mukobo R-P., Muyumba D. K., Mubemba M. M., Faucon M-P, Kimbamba L. T., Andres L., John A., Vandenheede N., Pourret O., Luhembwe M. N., Colinet G., 2018 - Fond pédogéochimique et cartographie des pollutions des sols à Lubumbashi. In Bogaert, Colinet G. & Mahy G. In *Presses Universitaires de Liège – Agronomie-Gembloux, Belgique*, pp. 214-228.
- Sokpon N., Biaou H. S., Ouinsavi C., Hunhyet O., 2006 - Bases techniques pour une gestion durable des forêts claires du Nord-Bénin : rotation, diamètre minimal d'exploitabilité et régénération. In *Bois et Forêts des Tropiques*, 287, pp. 45-57.
- Soulama S., Kadéba A., Nacoulma B. M. I., Traore S., Bachmann Y., Thiombiano A., 2015 - Impact des activités anthropiques sur la dynamique de la végétation de la réserve partielle de faune de Pama et de ses périphéries (sud-est du Burkina Faso) dans un contexte de variabilité climatique. In *Journal of Applied Biosciences*, 87 : pp. 8047– 8064.