



## Land Occupation and Utilization Dynamics in the Sirarou and Gbégourou Districts of Benin

### Dynamique de l'occupation et de l'utilisation des terres dans les arrondissements de Sirarou et de Gbégourou au Bénin

Naboua Kouhoundji

#### Article history:

Submitted: Nov. 10, 2025

Revised: Dec. 10, 2025

Accepted: Dec. 20, 2025

#### Keywords:

Land cover, spatio-temporal dynamics, remote sensing, MOLUSCE modeling, N'Dali

#### Mots clés :

Occupation des terres, dynamique spatio-temporelle, télédétection, modélisation MOLUSCE, N'Dali

#### Abstract

This study analyzes the dynamics of land cover and land use in the districts of Sirarou and Gbégourou (N'Dali municipality, Benin) using Sentinel-2B images from 2015 and 2025. A supervised classification based on the maximum likelihood algorithm was applied to map land-use changes over the study period, while the MOLUSCE model implemented in QGIS was used to simulate land cover patterns for the 2035 horizon. The results reveal a marked regression of natural formations between 2015 and 2025, to the benefit of anthropogenic formations. Open forests and wooded savannas lost 68% of their area over ten years, corresponding to an annual regression rate of 11.29%, with 82.37% of their area converted into other land-use classes. Tree and shrub savannas declined by 48%, representing an annual expansion rate of -6.60%, with 68.08% of their area converted into other units. Regarding anthropogenic formations, plantations experienced an overall increase of +99.90%, corresponding to an annual expansion rate of 6.93%, with 9.29% of their area converted into other units. Cropland-fallow mosaics recorded the highest expansion, with a 159.17% increase in area, corresponding to an annual expansion rate of 9.52%, compared to only 1.10% of their area converted into other units. Built-up areas also increased significantly, with a growth of 131.7%, corresponding to an annual expansion rate of 8.40%. Projections for the 2035 horizon confirm the continuation of these trends, albeit at a relatively slower pace. Thus, open forests and wooded savannas are expected to decline by 63.71% of their total area, while tree and shrub savannas will be reduced by 32%. At the same time, an expansion of built-up areas (+41.40%), plantations (+39%), and cropland-fallow mosaics (+2.42%) is projected. These results highlight the need to integrate these dynamics into local land-use planning policies in order to reconcile agricultural expansion, the preservation of ecosystem services, and biodiversity conservation.

#### Résumé

La présente étude analyse la dynamique de l'occupation et de l'utilisation des terres dans les arrondissements de Sirarou et Gbégourou (commune de N'Dali, Bénin) à partir d'images Sentinel-2B de 2015 et 2025. Une classification supervisée par maximum de vraisemblance a permis de cartographier les changements intervenus au cours de la période d'étude, tandis que le modèle MOLUSCE sous QGIS a servi à simuler l'occupation des terres à l'horizon 2035. Les résultats révèlent une régression marquée des formations naturelles entre 2015 et 2025, au profit des formations anthropiques. Les forêts claires et savanes boisées ont perdu 68% de leur superficie en 10 ans, soit un taux annuel de régression de 11,29 % avec 82,37 % de superficie convertie en d'autres unités. Quant aux savanes arborées et arbustives, elles ont diminué de 48 %, soit un taux annuel d'expansion de -6,60 % avec 68,08 % de superficie convertie en d'autres unités. Au niveau des formations anthropiques, les plantations ont eu un gain global de +99,90 %, soit un taux annuel d'expansion de 6,93 % avec 9,29 % de superficie convertie en d'autres unités. Les Mosaïques de Cultures et Jachères ont connu la plus grande expansion avec 159,17 % de gain de superficie, soit un taux annuel d'expansion de 9,52 % contre 1,10 % de superficie convertie en d'autres unités. Quant aux surfaces bâties, elles ont connu une augmentation de 131,7 %, soit un taux annuel d'expansion de 8,40 %. Les projections à l'horizon 2035 confirment la poursuite de ces tendances, avec une vitesse relativement plus faible. Ainsi, les forêts claires et savanes boisées connaîtront une diminution de 63,71 % de leur superficie totale alors que les savanes arborées et arbustives seront réduites de 32 %. Parallèlement, il sera noté une expansion des zones bâties (+41,40 %), des plantations (+39 %) et des mosaïques de cultures et jachères (+2,42 %). Ces résultats soulignent la nécessité d'intégrer ces dynamiques dans les politiques locales d'aménagement pour concilier expansion agricole, préservation des services écosystémiques et conservation de la biodiversité.

#### Corresponding author:

Naboua Kouhoundji,

Université d'Abomey-Calavi

E-mail : [kouhoundjiab@gmail.com](mailto:kouhoundjiab@gmail.com)

## Introduction

### Contexte et justification

Les mutations spatiales apparaissent comme des faits majeurs dans l'histoire contemporaine de l'Afrique occidentale surtout à partir de 1960, année des indépendances (Dahande et Honvo 68). Plus particulièrement au Bénin, les changements dans l'occupation des terres se traduisent par la déforestation et la dégradation du couvert végétal. Ces changements s'accroissent à un rythme effréné et inquiétant (Agbanou 15). Les principaux facteurs directs de ces changements observés à l'échelle globale, émanent des activités humaines, notamment la déforestation, l'urbanisation et l'intensification de l'agriculture (Lambin et *al.* 122). Cette intensification de l'agriculture couplée à son usage inapproprié est une conséquence de l'explosion démographique impactant la qualité environnementale, et provoquant une surexploitation des sols et des ressources hydriques ainsi que le surpâturage (A. Ozer et P. Ozer 397).

La dynamique d'occupation de l'espace par l'agriculture extensive prend aujourd'hui des proportions croissantes dans les savanes d'Afrique de l'Ouest (Bouko et *al.* 21). En effet, les forêts offrent des avantages incommensurables aux populations du continent (FAO, 2020). Il se fait également remarquer que la limite des connaissances sur la dynamique de l'occupation du sol actuelle et future pour la conservation de la biodiversité au Bénin, handicape les mécanismes de gestion durable. La connaissance de ces dynamiques et de l'utilisation des sols est considérée depuis plusieurs années comme un des éléments clés permettant de comprendre les relations sous-jacentes des facteurs anthropiques avec l'environnement (Orékan 154 ; Tchibozo et *al.* 508). Cette thématique a été l'objet de plusieurs recherches ayant démontré que les formations souvent naturelles connaissent dans la plupart des cas une dynamique régressive (Agbanou 15 ; Diédhiou et *al.* 13 ; Sidi 84 ; Adjonou et *al.* 170 ; Adjinda et Hounton 84 ; Mensah 169). Cette dynamique est essentiellement due aux effets de la pression démographique (Moumouni et *al.* 63). Selon ces mêmes auteurs, les formations végétales changent de physionomie dans le temps sous l'effet des facteurs naturels et anthropiques. Parmi ces facteurs, l'agriculture joue un rôle majeur. Pourtant, elle ne parvient pas encore à couvrir totalement les besoins de la population béninoise (Orekan et *al.* 29). Le secteur agricole du Bénin reste donc confronté à de nombreux défis, notamment la faible productivité agricole, la faible

utilisation des technologies modernes, la difficulté d'accès au crédit agricole et la faiblesse de la valeur ajoutée des produits agricoles.

Les arrondissements de Sirarou et de Gbégourou situés dans le département du Borgou, plus précisément dans la Commune de N'dali, font face aux mêmes difficultés. En effet, le secteur d'étude connaît une forte évolution démographique, avec une population passant de 21.817 habitants en 2002 à 39.977 habitants en 2013 (RGPH 2002 et 2013). Selon les travaux de B. A. Boni et *al.* (2015, 30) et S. Mensah (2014, 169), l'accroissement de la population du secteur d'étude provoque une augmentation de la demande en alimentation. Dès lors, il apparaît nécessaire de connaître le potentiel en zone agricole pouvant satisfaire les besoins alimentaires de la population. La présente étude se propose de caractériser la dynamique spatio-temporelle de l'occupation des terres entre 2015 et 2025 dans les arrondissements de Sirarou et de Gbégourou, puis de simuler l'évolution probable à l'horizon 2035 à l'aide du modèle MOLUSCE (Modules for Land Use Change Evaluation). Les résultats attendus permettront d'améliorer les modes de gestion territoriale afin de concilier productivité agricole et conservation de la biodiversité.

## **1. Données et méthodes**

### **1.1. Cadre d'étude**

Le secteur d'étude est constitué des arrondissements de Sirarou et de Gbégourou, tous deux mitoyens. Il est situé entre les parallèles 9° 22' 09" et 9° 41' 32" et les méridiens 2° 29' 15" et 2° 49' 09". D'une superficie de 817,39 km<sup>2</sup>, il est limité au nord par les arrondissements de N'dali et de Ouénou, à l'ouest par l'arrondissement de Bori, au sud par la Commune de Parakou (2è et 3è arrondissements) et la commune de Tchaourou (Arrondissement de Kika), et à l'est par la Commune de Pèrèrè (Arrondissement de Guinagourou). Sur le plan administratif, ce secteur regroupe cent vingt-deux (122) villages, hameaux et quartiers de villes (Figure 1).

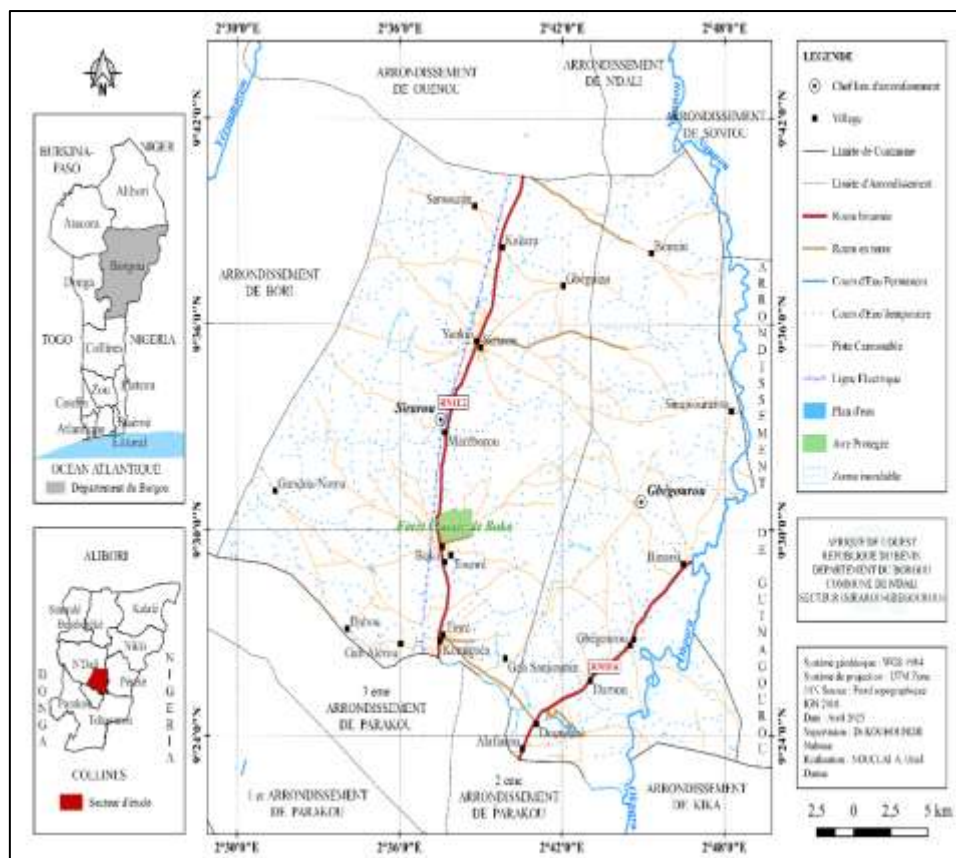


Figure 1 : Situation géographique des arrondissements de Sirarou et de Gbégourou

Le secteur d'étude jouit d'un climat de type continental soudano-Guinéen comportant deux saisons, notamment une saison des pluies couvrant la période d'Avril à Octobre et une saison sèche allant d'Octobre à Avril. La saison sèche est caractérisée par l'harmattan, un vent sec qui souffle généralement de fin novembre à février. La pluviométrie moyenne varie entre 1100 mm et 1200 mm, pouvant descendre jusqu'à 900 mm. La végétation est principalement constituée de savane boisée, avec une flore arborescente, herbacée et arbustive. Il est noté la présence de reliques forestières, notamment la forêt classée de Boko. Les sols rencontrés sont essentiellement de type ferrugineux tropical. Le système de culture pratiqué est de type extensif. La population qui y vit est majoritairement formée de deux (02)

groupes ethnolinguistiques : les Bariba et les Peulhs.

### 1.2. Données utilisées

Les données utilisées au cours de cette étude sont de type planimétrique et satellitaire. Il s'agit essentiellement du fond topographique issu de la base de données de l'Institut Géographique National (IGN), des images Sentinel-2B des années 2015 et 2025 (10 m x10m) et des ortho-images du projet OBSYDYA (Observatoire pilote des paysages et des Dynamiques Agricoles dans le Centre et le Nord Bénin). Les images Sentinel ont été téléchargées sur la plateforme « *Copernicus browser* » disponible via le lien <https://browser.dataspace.copernicus.eu>. Toutes les images ont été traitées sous le logiciel ENVI 5.1 et les géo-traitements ont été faits avec le logiciel QGIS 3.22.6.

Les images Sentinel-2B des années 2015 et 2025 ont été respectivement prises le 03/01/2015 et le 06/01/2025. Ces dates se situent vers la fin de la période des dernières récoltes de culture dans la zone d'étude (Nord Bénin). La végétation est encore fournie et on peut facilement faire une différenciation dans la couverture végétale. La couverture nuageuse est presque nulle car la saison sèche est à ses débuts.

### 1.3. Démarche de traitement des images Sentinel

Le traitement des images a consisté tout d'abord à importer les différentes bandes afin de les assembler et d'effectuer une composition colorée en fausse couleur. Afin de mettre en évidence la végétation, la combinaison suivante a été faite : B8 (PIR) → Rouge, B4 (Rouge) → Vert, B3 (Vert) → Bleu. Par suite le secteur d'étude a été extrait et une amélioration du contraste de l'image a été effectuée avant de définir les aires d'entraînement et procéder à la classification. Enfin les résultats issus de la classification ont été évalués par diverses méthodes (voir figure 2) dans le but d'affiner la qualité des résultats. La Figure 2 présente les étapes de Classification des images Sentinel-2B.

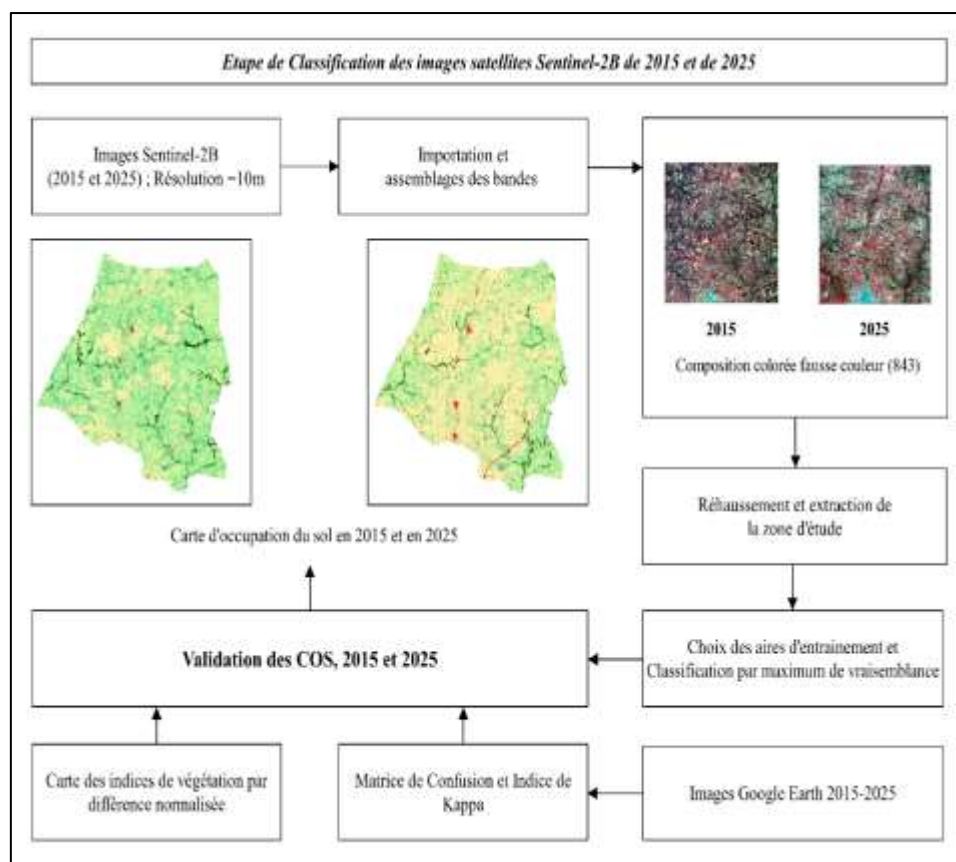


Figure 2 : Étapes de classification des images

À l'analyse de la figure 2, après l'amélioration du contraste et l'extraction de la zone d'étude, des aires d'entraînement ont été choisies et la classification supervisée basée sur le maximum de vraisemblance a été effectuée. Pour le choix des aires d'entraînement, sept (07) catégories d'occupation des terres ont été dégagées entre 2015 et 2025 : forêt galerie (FG), forêt claire et savane boisée (FCSB), savanes arborée et arbustive (SASA), plantation (PLT), mosaïque de culture et jachère (MCJ), agglomération (AGG) et plan d'eau (PE).

La validation des résultats issus du traitement a été faite par la matrice de confusion et l'indice de Kappa, après avoir utilisé le NDVI (indice de végétation par différence normalisée) pour améliorer le traitement (équation 1).

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R) \text{ (équation 1)}$$



Avec

*PIR=proche infra-rouge (B8)*

*R=rouge (B4)*

Le cadre de la matrice de confusion est présenté dans le tableau 1.

Tableau 1 : Cadre de la matrice de confusion

	Unité d'occupation	CLASSIFICATION				Paramètres			
		U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	...	U <sub>n</sub>	TOTAL	Précision Utilisateur	Erreur de commission	IC(95%)
REFERENCE (Echantillons)	U <sub>1</sub>								
	U <sub>2</sub>								
	...								
	U <sub>n</sub>								
Paramètres	TOTAL								
	Précision producteur						Précision globale		
	Erreur d'omission							Erreur globale	
	IC(95%)								IC globale

Source : N. Kouhoundji (2017, 61)

A partir de cette matrice de confusion, l'intervalle de confiance (IC) à 95% de chaque unité d'occupation de sol échantillonnée est calculé par :

$$IC = (P \cdot (1-P) / n)^{1/2} \cdot 1,96 \quad (\text{équation 2})$$

Avec

*IC = Intervalle de confiance, probabilité de commettre une erreur de classification*

*P= Précision de l'unité d'occupation de sol (résultat matrice de confusion)*

*n = Nombre total de points d'observations (échantillons)*

L'intensité du lien entre les résultats des classifications et ceux d'observations (aires d'entraînement) est appréciée par le coefficient Kappa K de Cohen (Cohen, 1960 ; 42 ; Lantz et Nebenzahl, 1996, 429). Se basant sur la matrice de confusion, le coefficient de Kappa (K) est calculé selon la formule suivante (équation 3) :

$$K = (P - P_e) / (1 - P_e) \quad (\text{équation 3})$$

Avec

*K = coefficient de Kappa*

$P$  = précision globale (proportion d'accord)

$Pe$  = erreur globale (proportion de désaccord)

Se basant sur la démarche de Streiner et Norman (1994), citée par Kouhoundji (2017, p62-63), un coefficient de Kappa K supérieur ou égal à 0,74 exprime un excellent accord entre les résultats de la classification et les observations sur le terrain. Les sources des données de validation proviennent des points GPS de terrain et de la photo-interprétation d'ortho-images du projet OBSYDYA.

#### 1.4. Analyse statistique de la dynamique de l'occupation et de l'utilisation des terres

La matrice de transition des unités d'occupations des terres est un tableau à double entrée présentant les changements apparents ayant eu lieu dans le secteur d'étude en 10 ans. Le nombre de ligne indique le nombre de formations au temps initial et le nombre de colonne indique le nombre de formations à la seconde date. La diagonale présente les unités d'occupation des terres restées inchangées. La matrice met ainsi en évidence les types de changements subits par les formations naturelles et anthropiques entre 2015 et 2025.

##### ***Taux moyen annuel d'expansion spatiale (T)***

Le taux moyen annuel d'expansion spatiale T exprime la proportion de chaque catégorie d'unité d'occupation des terres qui change par an. Il permet d'estimer la vitesse d'évolution d'une unité d'occupation sur une période donnée. Il est exprimé en pourcentage (%). La formule de Bernier (1992) a été utilisée pour calculer le taux annuel d'expansion spatiale (T).

$$T = [(lnS2 - lnS1) / (t2 - t1)] \times 100$$

Où :

$S2$  représente la superficie d'une unité d'occupation à la date  $t2$  ;

$S1$  représente la superficie d'une unité d'occupation à la date  $t1$  ;

$t2 - t1$  exprime le nombre d'année d'évolution.

##### ***Taux de conversion (Tc)***

Le taux de conversion d'une unité d'occupation des terres exprime le degré de transformation de cette classe lors de sa conversion en d'autres classes. Il s'agit donc de mettre en évidence les changements observés au niveau des unités d'occupation des terres entre 2015 et 2025 (10 ans). Le taux de conversion est



obtenu selon la formule suivante :

$$Tc = [(Sit - Sis) / Sit] \times 100$$

*Sit* : Superficie de l'unité d'occupation  $i$  à la date  $t'$  (2015) ;

*Sis* : Superficie de la même unité demeurée stable à la date  $t_1$  (2025) (I. Maço, 2016, p. 83)

### 1.5. Méthode de modélisation de la dynamique des formations naturelles et anthropiques à l'horizon 2035.

Les cartes d'occupation des terres des années 2015 et 2025 sont les principales données utilisées en plus des variables dépendantes exogènes. Ces variables sont : l'altitude, les localités, les distances aux routes et aux réseaux hydrographiques. Les cartes d'occupation des terres sont converties au format raster ; le même procédé est effectué pour les cartes traduisant les facteurs explicatifs. Le modèle génère une matrice de transition et une carte de changement des unités d'occupation des terres entre 2015 et 2025. Au cours de la modélisation, la méthode utilisée est basée sur le Artificial Neural Network (ANN) avec un taux d'apprentissage de 0,1. Le maximum des itérations a été fixé à 1000. Ainsi, le modèle génère une carte de simulation de l'occupation des terres à l'horizon 2035.

L'évolution probable de la végétation a été estimée à partir de la matrice des probabilités de transition. Une période de 10 ans est suffisamment longue pour observer les tendances significatives, mais pas trop éloignée pour que les hypothèses restent valables (P. H. Verburg et *al.*, 2004, 312 ; Eastman, 2012).

La Figure 3 présente le fonctionnement général du Plugin MOLUSCE.

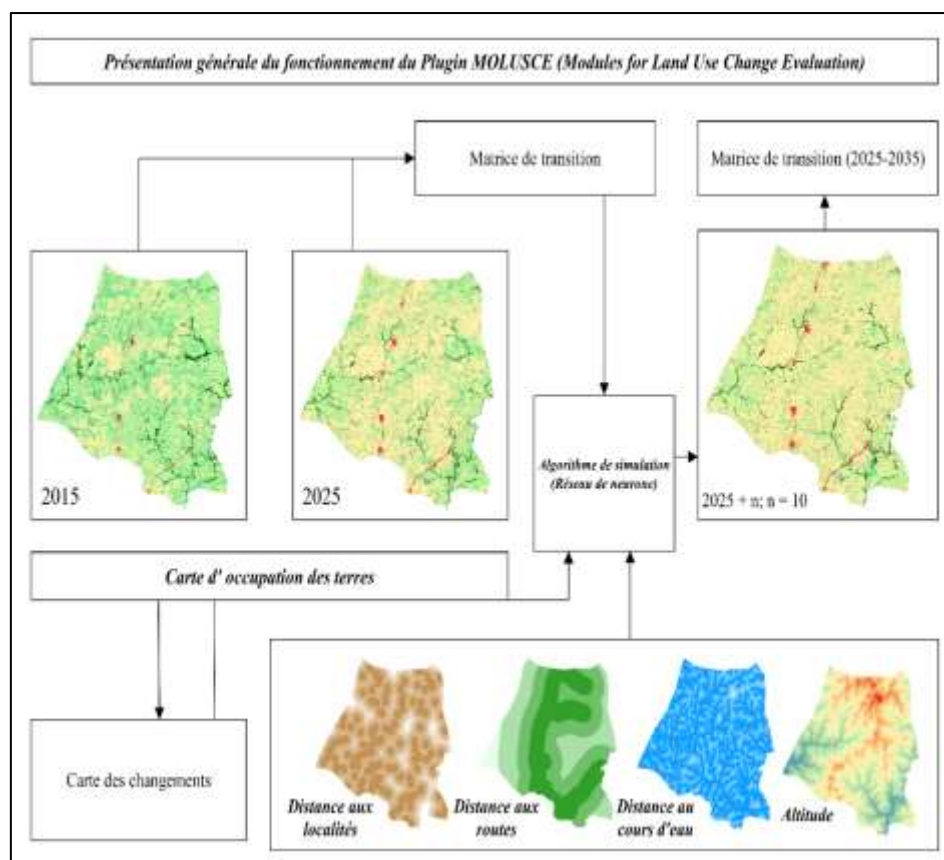


Figure 3 : Fonctionnement général du Plugin MOLUSCE

## 2. Résultats et discussion

### 2.1. Etat de l'occupation des terres dans le secteur d'étude en 2015

Le résultat du traitement de l'image de 2015 affichait une précision globale de 87,88 % et un coefficient de Kappa K égal à 0,86. Il y a alors un excellent accord entre les unités de classification et celles de référence. L'erreur globale commise sur les affectations des pixels à leurs classes respectives était de 12,12 %. Ces résultats permettent de valider le traitement. Le paysage du secteur d'étude avait une couverture végétale importante comme l'indiquent le tableau 2 et la figure 4.

Tableau 2 : Superficies des unités d'occupation du sol du secteur d'étude en 2015

Unité d'occupation	Superficie (ha)	Proportion
FG	3337,66	4,09%
FCSB	20542,36	25,15%
SASA	34175,84	41,84%
PLT	11400,14	13,96%
MCJ	11727,97	14,36%
AGG	458,95	0,56%
PE	40,97	0,05%
<b>Totaux</b>	<b>81683,89</b>	<b>100,00%</b>

**Légende :** FG : Forêts Galeries ; FCSB : Forêts Claires et Savanes boisées ; SASA : Savanes Arborées et Savanes Arbustives ; PLT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Cultures et Jachères ; AGG : Agglomérations ; PE : Plans d'eau ; UOT : Unité d'occupation des terres ; SUP : Superficie

Source : Résultats du traitement de l'image Sentinel de 2015

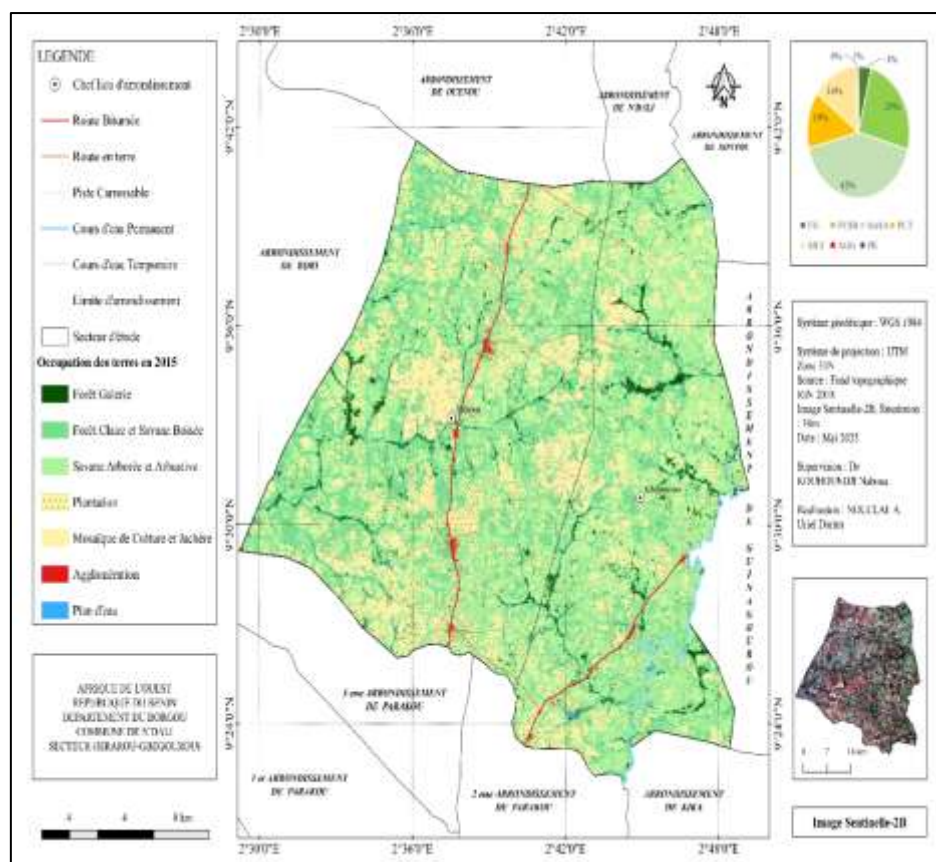


Figure 4 : Etat de l'occupation du sol dans le secteur d'étude en 2015

A l'analyse du tableau 2 et de la figure 4, sept (07) catégories d'occupation des terres sont mises en évidence : les forêts galeries (FG), les forêts claires et savanes boisées (FCSB), les savanes arborées et arbustives (SASA), les plantations (PLT), les mosaïques de cultures et jachères (MCJ), les agglomérations (AGG) et les plans d'eau (PE). Le paysage est majoritairement structuré par les SASA, FCSB et MCJ qui occupent ensemble 81,35 % de la superficie totale. Les SASA dominent avec 41,84 %. À l'inverse, les forêts galeries, les agglomérations et les plans d'eau sont faiblement représentées avec un total de 4,70 %. Les MCJ sont localisées principalement au centre du secteur, traduisant une forte activité agricole dans cette zone. Les agglomérations suivent deux axes de répartition : l'un orienté nord-sud, l'autre sud-nord-est, créant ainsi une certaine fragmentation du territoire. Les autres unités, plus dispersées, se retrouvent un peu partout sans concentration

particulière. La situation n'a pas été identique en 2025.

## 2.2. Etat de l'occupation des terres dans le secteur d'étude en 2025

Le résultat du traitement de l'image de 2025 affichait une précision globale de 93,65 % et un coefficient de Kappa K égal à 0,93. Il y a alors un excellent accord entre les unités de classification et celles de référence. L'erreur globale commise sur les affectations des pixels à leurs classes respectives était de 6,35 %. Ces résultats permettent de valider le traitement. Ainsi, la répartition des unités d'occupation est montrée dans le tableau 3 et la figure 5.

Tableau 3 : Superficies des unités d'occupation du sol du secteur d'étude en 2025

Unité d'occupation	Superficie (ha)	Proportion
FG	3081,55	3,77%
FCSB	6642,56	8,13%
SASA	17671,86	21,63%
PLT	22787,99	27,90%
MCJ	30395,59	37,21%
AGG	1063,37	1,30%
PE	40,97	0,05%
<b>Totaux</b>	<b>81683,89</b>	<b>100,00%</b>

**Légende :** FG : Forêts Galeries ; FCSB : Forêts Claires et Savanes boisées ; SASA : Savanes Arborées et Savanes Arbustives ; PLT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Cultures et Jachères ; AGG : Agglomérations ; PE : Plans d'eau ; UOT : Unité d'occupation des terres ; SUP : Superficie

Source : Résultats du traitement de l'image Sentinel de 2025

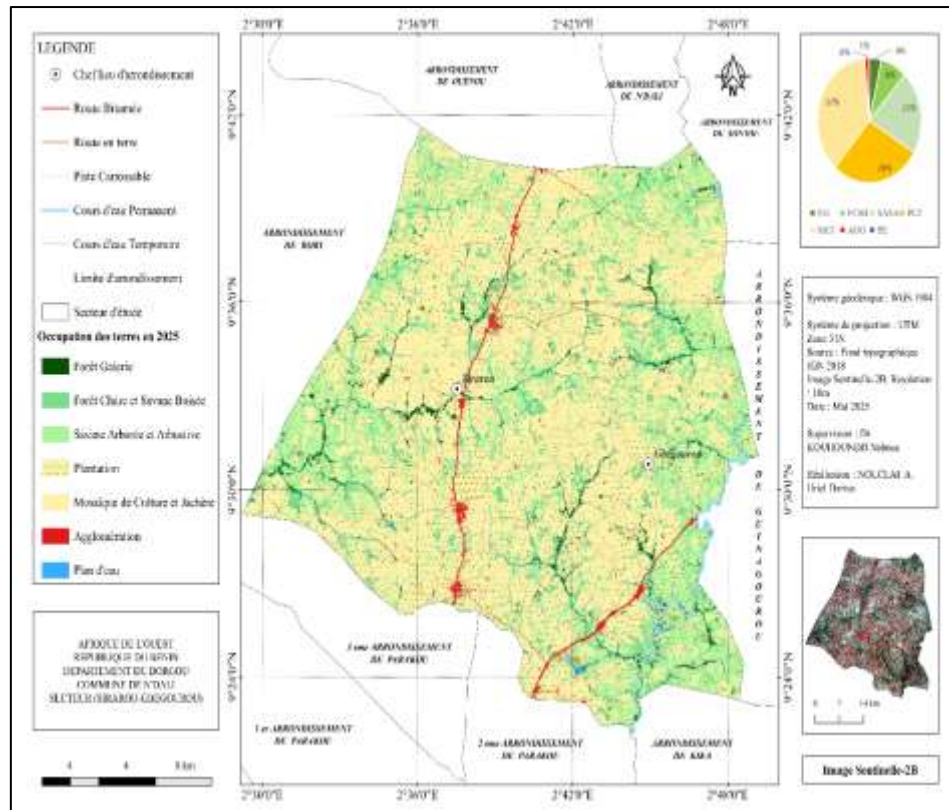


Figure 5 : Etat de l'occupation du sol dans le secteur d'étude en 2025

L'analyse du tableau 3 et de la figure 5 montre que le secteur d'étude était dominé par les plantations, les mosaïques de cultures et jachères et par les savanes arborées et arbustives. Ces unités occupaient 86,74 % et étaient dispersées dans le secteur étudié. En dehors des plans d'eau, les agglomérations occupaient la plus petite proportion (1,30 %). Elles étaient suivies des forêts galeries avec 3,77 % de superficie totale occupée. Les agglomérations étaient réparties selon plusieurs axes, principalement le long des voies, dans les directions Nord-Sud. Les forêts claires et savanes boisées, avec leur 8,13 % de taux d'occupation, se retrouvaient dispersées au même titre que les savanes arborées et savanes arbustives.

### 2.3. Changement dans l'occupation des terres dans le secteur d'étude entre 2015 et 2025

En analysant les résultats des images 2015 et 2025, plusieurs transformations



ont été notées. Le tableau 4 présente la matrice de transition des unités d'occupation entre ces 2 dates.

Tableau 4 : Transition des unités d'occupation du sol entre 2015 et 2025

UOT en 2015	UOT en 2025							SUP en 2015
	FG	FCSB	SASA	PLT	MCJ	AGG	PE	
FG	1835,82	629,01	872,83	0	0	0	0	3337,66
FCSB	1245,73	3622,47	5890,62	4378,52	5318,97	86,05	0	20542,36
SASA	0	2391,08	10908,41	8068,61	12332,4	475,34	0	34175,84
PLT	0	0	0	10340,86	1006,01	53,27	0	11400,14
MCJ	0	0	0	0	11598,89	129,08	0	11727,97
AGG	0	0	0	0	139,32	319,63	0	458,95
PE	0	0	0	0	0	0	40,97	40,97
SUP en 2025	3081,55	6642,56	17671,86	22787,99	30395,59	1063,37	40,97	81683,89

**Légende :** FG : Forêts Galeries ; FCSB : Forêts Claires et Savanes boisées ; SASA : Savanes Arborées et Savanes Arbustives ; PLT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Cultures et Jachères ; AGG : Agglomérations ; PE : Plans d'eau ; UOT : Unité d'occupation des terres ; SUP : Superficie

*Source : Résultats de traitement des données, juin 2025*

Une lecture rapide du tableau 4 permet de constater que la superficie totale des unités d'occupation de 2015 est égale à celle de 2025. L'analyse de ce tableau révèle que ces unités d'occupation des terres ne sont pas restées stables pendant 10 ans. En effet, certaines formations naturelles ont régressé au profit des formations anthropiques. Entre 2015 et 2025, les forêts galeries ont perdu 1501,84 ha. En d'autres termes, 629,01 ha de forêts galeries sont converties en forêts claires et savanes boisée et 872,83 ha sont transformés en savanes arborées et savanes arbustives. Dans le même temps, 1245,73 ha de forêts claires et savanes boisées sont converties en forêts galeries. Comme résultante, les forêts galeries ont perdu 256,11 ha avec un taux annuel d'expansion de - 0,80 % et 45 % de superficie convertie en d'autres unités (tableau 5).

Tableau 5 : Résultante des changements des unités d'occupation entre 2015 et 2025

UOT	FG	FCSB	SASA	PLT	MCJ	AGG	PE
Superficie 2015 (ha)	3337,66	20542,36	34175,84	11400,14	11727,97	458,95	40,97
Superficie 2025 (ha)	3081,55	6642,56	17671,86	22787,99	30395,59	1063,37	40,97
Superficie stable (ha)	1835,82	3622,47	10908,41	10340,86	11598,89	319,63	40,97
Gain/Perte (ha)	-256,11	-13899,80	-16503,98	11387,85	18667,62	604,42	0
Taux annuel d'expansion (T)	-0,80	-11,29	-6,60	6,93	9,52	8,40	0,00
Taux de conversion (Tc)	45,00	82,37	68,08	9,29	1,10	30,36	0,00

*Source : Résultats de traitement des données, juin 2025*

En dehors de la conversion en forêts galeries, les forêts claires et savanes boisées (FCSB) ont subi de lourdes pertes avec des conversions en Savanes Arborées et Savanes Arbustives (5890,62 ha), en Plantations (4378,52 ha), en Mosaïques de Cultures et Jachères (5318,97 ha) et en Agglomérations (86,05 ha) (tableau 4). Parallèlement, elles ont obtenu 629,01 ha de forêts galeries et 2391,08 de savanes arborées et arbustives. En définitive, les forêts claires et savanes boisées ont perdu 13899,80 ha en 10 ans, soit un taux annuel d'expansion de -11,29 % avec 82,37 % de superficie convertie en d'autres unités (tableau 5). En ce qui concerne les savanes arborées et savanes arbustives (SASA), en plus de leur conversion en forêts claires et savanes boisées, elles ont été transformées en Plantations (8068,61 ha), en Mosaïques de Cultures et Jachères (12332,4 ha) et en Agglomérations (475,34 ha). D'un autre côté, elles ont récupéré des forêts galeries et forêts claires et savanes boisées, ce qui leur a conféré une perte globale de 16 503,98 ha, soit un taux annuel d'expansion de -6,60 % avec 68,08 % de superficie convertie en d'autres unités (tableau 5). De cette analyse, on en déduit que les formations naturelles, à savoir, les forêts galeries (FG), les forêts claires et savanes boisées (FCSB) et les savanes arborées et arbustives (SASA), ont subi une dynamique régressive.

En analysant les plantations (PLT), elles ont été converties en Mosaïques de Cultures et Jachères (1006,01 ha) et en Agglomérations (53,27 ha). Néanmoins, elles ont récupéré 4378,52 ha de Forêts Claires et Savanes boisées et 8068,61 ha de Savanes Arborées et Savanes Arbustives ; ce qui leur a conféré un gain global de 11 387,85 ha en 10 ans, soit un taux annuel d'expansion de 6,93 % avec 9,29 % de superficie convertie en d'autres unités (tableau 5). Malgré la conversion de 129,08 ha de leurs espaces en Agglomérations, les Mosaïques de Cultures et Jachères (MCJ) ont été en revanche enrichies en superficie de 139,32 ha d'autres agglomérations, de 1006,01 ha de Plantations, de 12332,4 ha de Savanes Arborées et Savanes arbustives et de 5318,97 ha de Forêts Claires et Savanes boisées. Ainsi, les Mosaïques de Cultures et Jachères ont connu un gain global de 18 667,62 ha, soit un taux annuel d'expansion de 9,52 % avec 1,10 % de superficie convertie en d'autres unités (tableau 5). Sur 458,95 ha que mesuraient les agglomérations, 139,32 ont été convertis en Mosaïques de Cultures et

Jachères. D'un autre côté, ces espaces d'agglomérations ont reçu les conversions de 86,05 ha de Forêts Claires et Savanes boisées, 475,34 ha de Savanes Arborées et Savanes Arbustives, 53,27 ha de Plantations et 129,08 ha de Mosaïques de Cultures et Jachères. En définitive, les agglomérations ont accru de 604,42 ha, soit un taux annuel d'expansion de 8,40 % avec 30,36 % de superficie convertie en d'autres unités (tableau 5).

De cette analyse, on en déduit que les formations anthropiques, à savoir, les plantations, les mosaïques de cultures et jachères et les agglomérations ont subi une dynamique progressive. Les espaces de plans d'eau sont restés statiques sur la période d'étude. Enfin, les mosaïques de cultures et jachères, les plantations et les savanes arborées et savanes arbustives sont les formations végétales les plus importantes en 2025 (tableau 4). On en conclut que la tendance d'évolution est la dégradation du couvert végétal.

## 2.4. Modélisation de la dynamique des unités d'occupation à l'horizon 2035

La modélisation avec le modèle MOLUSCE a permis d'obtenir une matrice de transition des changements potentiels et une carte des unités d'occupation du sol. Le tableau 6 présente l'esquisse des superficies des unités d'occupation du sol issues de la modélisation.

Tableau 6 : Matrice de probabilité de transition des unités d'occupation à l'horizon 2035

Probabilité de 2035									
	UOT	FG	FCSB	SASA	PLT	MCJ	AGG	PE	SUP 2025
Probabilité de 2025	FG	2622,61	0	303,23	6,14	149,57	0	0	3081,55
	FCSB	272,31	2189,14	2580,53	1583,81	12,68	4,09	0	6642,56
	SASA	0	213,08	7624	3620,43	6198,05	16,3	0	17671,86
	PLT	0	0	266,35	22464,3	25,71	31,63	0	22787,99
	MCJ	0	8,19	1231,4	3894,49	24746,3	515,21	0	30395,59
	AGG	0	0	2,04891	124,98	0	936,34	0	1063,37
	PE	0	0	0	0	0	0	40,97	40,97
SUP 2035		2894,92	2410,41	12007,56	31694,15	31132,31	1503,57	40,97	81683,89
<b>Légende :</b> FG : Forêts Galeries ; FCSB : Forêts Claires et Savanes boisées ; SASA : Savanes Arborées et Savanes Arbustives ; PLT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Cultures et Jachères ; AGG : Agglomérations ; PE : Plans d'eau ; UOT : Unité d'occupation des terres ; SUP : Superficie									

*Source : Résultats de traitement et modélisation des données, juin 2025*

A l'issue de la modélisation, la précision globale obtenue est de 98 % avec un coefficient de Kappa K qui est de 75 % à l'horizon 2035. Quelques indicateurs ont été calculés pour apprécier et analyser l'ampleur des changements projetés. Ils sont résumés dans le tableau 7.

Tableau 7 : Résultante des changements modélisés des unités d'occupation entre 2025 et 2035

UOT	FG	FCSB	SASA	PLT	MCJ	AGG	PE
<b>Superficie 2025 (ha)</b>	3081,55	6642,56	17671,86	22787,99	30395,59	1063,37	40,97
<b>Superficie 2035 (ha)</b>	2894,92	2410,41	12007,56	31694,15	31132,31	1503,57	40,97
<b>Superficie stable (ha)</b>	2622,61	2189,14	7624,00	22464,30	24746,30	936,34	40,97
<b>Gain/Perte (ha)</b>	-186,63	-4232,15	-5664,30	8906,16	736,72	440,20	0,00
<b>Taux annuel d'expansion (T)</b>	-0,62	-10,14	-3,86	3,30	0,24	3,46	0,00
<b>Taux de conversion (Tc)</b>	14,89	67,04	56,86	1,42	18,59	11,95	0,00

*Source : Résultats de traitement des données, juin 2025*

L'analyse des tableaux 6 et 7 révèle que les formations naturelles (FG, FCSB, SASA) continueraient de régresser alors que les formations anthropiques (PLT, MCJ, AGG) progresseraient. En effet, à l'horizon 2035, les forêts galeries (FG) passeraient de 3081,55 ha à 2894,92 ha, soit une diminution globale de 186,63 ha (tableaux 6 et 7). Il s'en suit que les forêts galeries régresseraient de 0,62 % chaque année avec un taux de conversion de 14,89 % en d'autres unités à l'horizon 2035. Les forêts claires et savanes boisées (FCSB) verraient leurs superficies passer de 6642,56 ha à 2410,41 ha, soit une diminution de 4232,15 ha, avec un taux de régression annuelle de 10,14 % pour un taux de conversion en d'autres unités de 67,04 % à l'horizon 2035. De leur côté, les savanes arborées et savanes arbustives (SASA) connaîtraient une expansion négative de 3,86 % par an avec une conversion en d'autres unités de 56,86 % à l'horizon 2035. Ce qui leur ferait une perte globale de 5664,30 ha générés par le modèle. En définitive, si rien n'est fait, les formations naturelles poursuivraient leur régression à l'horizon 2035.

Les plantations (PLT) vont continuer par s'étendre à raison de 3,30 % par an, mais 1,42 % de la superficie seront convertis en d'autres unités, pour un gain global pouvant atteindre 8906,16 ha à l'horizon 2035. En revanche, les mosaïques de cultures et jachères (MCJ) auront gagné moins de superficie (736,72 ha) avec un taux plus élevé de conversion en d'autres unités (18,59 %) et un taux d'expansion plus réduit (0,24 % par an). Mais, les agglomérations

connaîtront un taux annuel d'expansion de 3,46 %, avec un taux de conversion en d'autres unités de 11,95 %.

La résultante de ces dynamiques s'est traduite spatialement par la carte d'occupation des unités modélisées présentées sur la figure 6.

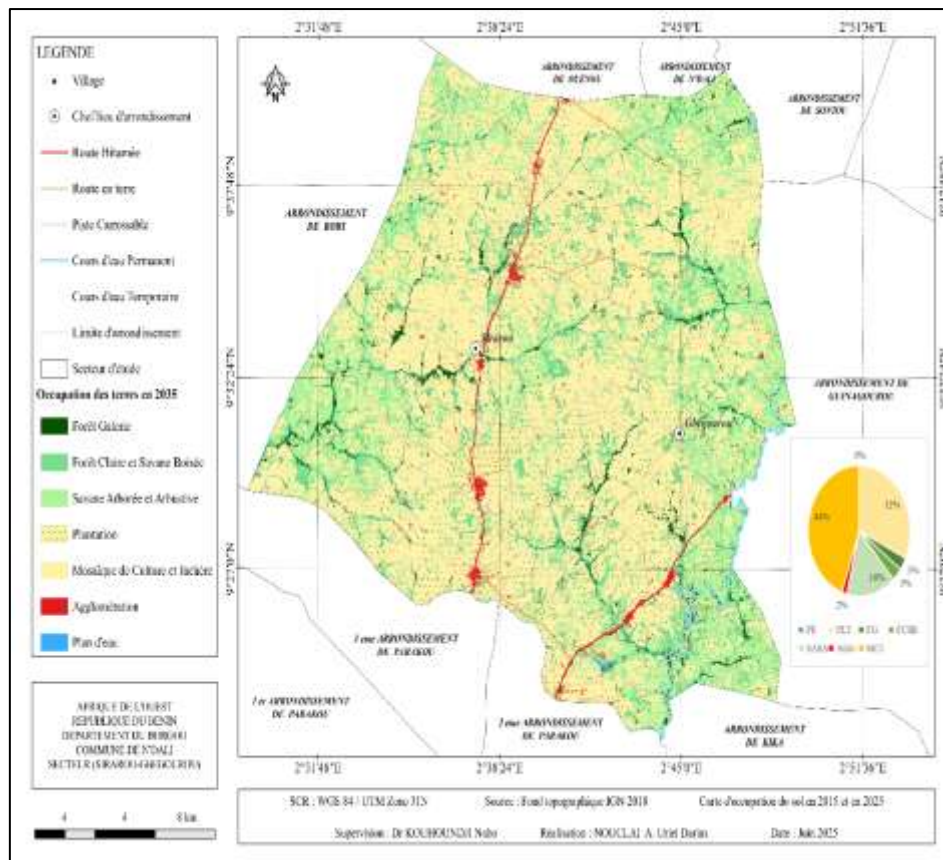


Figure 6 : Simulation de l'occupation des terres à l'horizon 2035

La figure 6 présente la carte prédictive de l'occupation des terres. Après analyse de la carte, on constate que les unités d'occupation des terres qui domineraient le secteur d'étude en 2035 sont les plantations (31694,15 ha) et les mosaïques de cultures et jachères (31132,31 ha). Elles seront suivies de loin par les savanes arborées et savanes arbustives (12007,56 ha). Ces chiffres, résumés à travers la figure 7 par leurs proportions, traduisent la dynamique des unités à l'horizon 2035.

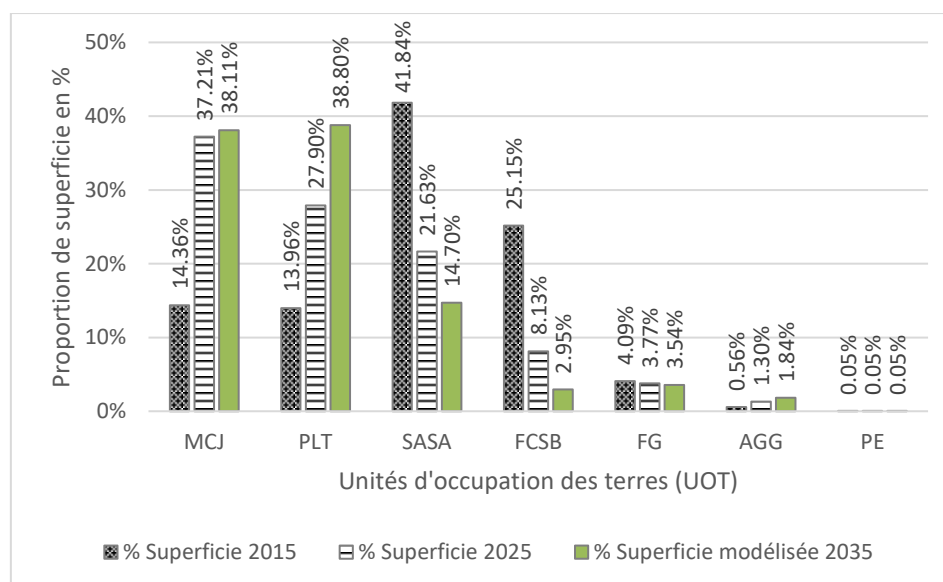


Figure 7 : Superficie des unités d'occupation des terres en 2015, 2025 et 2035  
A travers la figure 7, le secteur d'étude était dominé en 2015 par les savanes arborées et savanes arbustives (42 %), suivies des forêts claires et savanes boisées (25 %). Le niveau d'anthropisation était alors faible. Dix ans plus tard, c'est-à-dire en 2025, les mosaïques de cultures et jachères (37 %) et les plantations (28 %) ont pris le dessus et totalisaient à elles deux seules 65 % du territoire étudié. A l'horizon 2035, le secteur sera toujours dominé par les plantations (39 %) et les mosaïques de cultures et jachères (38 %).

## 2.5. Discussion

Les trois (03) angles d'analyse à savoir : l'état de l'occupation des terres en 2015 et en 2025 des arrondissements de Sirarou et de Gbégourou, l'analyse des changements survenus entre les 2 dates et la modélisation prospective sur la base des tendances actuelles, ont été discutés.

### Cartographie de l'état de l'occupation des terres en 2015 et en 2025 dans le secteur d'étude

La cartographie de l'état de l'Occupation des terres en 2015 et en 2025 dans le secteur d'étude a fait ressortir les unités d'occupation des terres qui impactaient en majeure partie sur le territoire étudié. En effet en 2015 on observe une occupation dominée par les formations végétales naturelles. Ceci



traduit une emprise encore significative des écosystèmes naturels en cette année, bien que des signes de pression anthropique soient perceptibles. La présence non négligeable des zones agricoles tels que les cultures et jachères ainsi que les plantations témoigne d'une activité agricole déjà bien installée. Dans le même temps, les zones urbaines occupaient une part très faible (1 % du secteur d'étude). Ces résultats confirment le caractère rural du territoire à cette époque. Il s'y reflétait donc un équilibre relatif entre formations naturelles et formations anthropiques. En 2025, les mosaïques de cultures et jachères et les plantations, dominant le secteur d'étude, confirment la progression des formations anthropiques. Des résultats similaires ont été observés par L. Moussa et *al.* (2016, 221) dans leur étude portant sur la modélisation de la dynamique des forêts galeries dans la zone de confluence Ouémé-Okpara, en milieu soudano-guinéen. L'augmentation des superficies des formations anthropiques en 2025 traduit une dynamique de dégradation des milieux naturels au profit de l'agriculture et des pratiques culturales extensives (E. Tchibozo et *al.*, 2020, 515). De la même manière, A. B. BONI et *al.* (2015, 33), dans leur étude sur la dynamique de l'occupation des terres dans la commune de N'Dali, ont trouvé des résultats similaires. En effet, alors qu'en l'an 2000, les formations anthropiques occupaient seulement 18,37 % du secteur d'étude, leur superficie dépassait 50 % en 2013. Ainsi, l'anthropisation s'est alors accrue en 2025 menaçant la durabilité des écosystèmes.

### **Analyse les changements intervenus dans l'occupation des terres entre 2015 et 2025**

Les résultats obtenus dans le secteur d'étude entre 2015 et 2025 montrent une mutation nette du paysage, caractérisée par une régression généralisée des formations végétales naturelles au profit d'unités d'occupation anthropique. Les savanes arborées et savanes arbustives constituent la catégorie la plus touchée. Ces tendances confirment une dynamique régressive des systèmes naturels. Dans la confluence Ouémé Okpara, L. Moussa et *al.* (2016, 222) ont montré le recul des savanes arborées et arbustives au profit des champs et jachères alors que la pression agro-pastorale s'intensifiait. Plus au sud, dans le secteur Natitingou Boukombé, T.B. Agbanou (2018, 11) avait signalé une régression marquée des formations denses (forêts claires, savanes boisées,

forêts galeries) et une progression simultanée des formations ouvertes et anthropisées. Autour du port sec d'Allada, P. Gnansounou (2021, 51) relèvait, pour la période 2005-2020, une conversion des formations naturelles en champs et jachères. Dans la commune de N'dali, A. B. BONI et *al.* (2015, 34) soulignaient la rapidité du processus d'anthropisation. Plusieurs facteurs convergents expliquent la situation dans les arrondissements de Sirarou et de Gbégourou : l'expansion agricole liée à la croissance démographique et à la demande de cultures vivrières et de rente ; la spéculation foncière pour les plantations (anacardier notamment) ; l'urbanisation diffuse alimentée par l'amélioration des axes routiers et l'attraction des pôles de services ; enfin, des pratiques de jachère de plus en plus courtes qui empêchent la reconstitution des savanes arbustives. L'augmentation sensible des mosaïques de cultures et jachères, conjuguée à la poussée des plantations, traduit un changement structurel du système agraire. Ces résultats confirment l'hypothèse de dégradation accélérée du couvert végétal naturel entre 2015 et 2025.

### **Modélisation de la dynamique des formations naturelles et anthropiques à l'horizon 2035**

Les résultats de la modélisation de la dynamique de l'occupation des terres dans les arrondissements de Sirarou et de Gbégourou à l'horizon 2035 révèlent une tendance générale à la régression des formations végétales naturelles, traduisant ainsi une forte pression sur les écosystèmes naturels. Ces résultats confirment une dynamique de dégradation continue des formations végétales, déjà observée dans d'autres zones du Bénin. La même tendance a été constatée par A. Dossou (2020, 66), dans son étude sur la cartographie prédictive de l'occupation des terres dans la commune de Ouèssè, où les mosaïques de champs et jachères ainsi que les plantations connaîtront une forte expansion à l'horizon 2030 et 2050, au détriment des formations végétales naturelles. Les superficies projetées traduisaient une intensification des pratiques agricoles. Ce processus de conversion des milieux naturels en terres agricoles ou en zones urbanisées illustre bien la transformation des paysages ruraux sous l'effet combiné de la pression démographique et de la croissance des besoins économiques. De même, I. Gbaï et *al.* (2024, 113) montraient que dans la commune de N'Dali, les projections à l'horizon 2060 à l'aide du modèle CA-Markov annonçaient une réduction drastique des unités

végétales naturelles, remplacées progressivement par des unités anthropiques telles que les champs, les jachères et les habitats. Cette convergence des résultats entre différentes études souligne la récurrence des processus de déforestation dans les régions septentrionales du Bénin.

### **Conclusion**

Cette étude a permis de comprendre les processus liés à l'occupation et à l'utilisation des terres dans les arrondissements de Sirarou et de Gbégourou grâce aux outils de la télédétection et du SIG. Il en ressort que les formations anthropiques subissent une dynamique progressive au détriment des formations naturelles au cours de la période 2015 à 2025. Le devenir des arrondissements du secteur d'étude a été projeté à partir de la modélisation prédictive. La carte de l'occupation des terres simulée à l'horizon 2035 sur la base des tendances actuelles révèle que l'évolution des plantations et des cultures et jachères sera accentuée tandis que les formations végétales naturelles vont perdre de plus en plus en superficie. Selon la matrice de probabilité de transition, les chances que les plantations et mosaïques de cultures et jachères se convertissent en savanes et forêts sont plus faibles que le phénomène inverse. En effet les formations anthropiques occuperont 79 % du secteur d'étude ; les formations naturelles, quant à elles, occuperont 21 % du territoire en 2035 si rien n'est fait. Il se fait remarquer que les changements produits entre 2015 et 2025 sont plus conséquents que les changements qui surviendront dans la période 2025-2035. Il convient que des mesures soient prises dans l'optique du renforcement des plans d'aménagement communal intégrant le zonage écologique, la promotion de systèmes agroforestiers moins destructeurs et la protection de certaines forêts galeries et savanes boisées clés. Afin d'améliorer les résultats de cette étude, il serait utile que les facteurs explicatifs de la dynamique de l'occupation et de l'utilisation des terres soient documentés de façon approfondie, avec l'intégration d'autres variables pour la modélisation prédictive à travers des données socio-économiques, des scénarii de changement climatique et les orientations des politiques publiques.

### **Remerciements**

La présente recherche ne pourrait aboutir sans l'accompagnement de certaines

personnes et structures. C'est le lieu de remercier le Dr ZAKARI Soufouyane, Enseignant-Chercheur à l'Institut National du Cadre de Vie (ICaV) de l'Université d'Abomey-Calavi pour son accompagnement dans la démarche méthodologique. Mes remerciements vont également à l'endroit du Professeur OREKAN Vincent, Enseignant-Chercheur au Département de Géographie de l'Université d'Abomey-Calavi, pour ses conseils dans l'analyse des résultats. Je m'en voudrais de ne pas remercier du fond du cœur Monsieur NOUCLAI Uriel Darius pour son assistance dans la mise en forme des rendus cartographiques. Que le Directeur Général de l'Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB), Dr SOSSOU C. Hervé, trouve ici ma parfaite reconnaissance pour m'avoir impliqué dans l'équipe technique du Projet OBSYDYA en collaboration avec les chercheurs du CIRAD et de l'IRD. Les données du projet OBSYDYA m'ont été très utiles. Je témoigne ma gratitude à toute l'équipe de gestion du projet.

### Œuvres citées

- Adjinda, S., et N. Hounton. *Contribution à l'étude de la dynamique de l'environnement dans une zone d'accueil*. Mémoire d'ingénieur des travaux, Collège Polytechnique Universitaire, Université Nationale du Bénin, Abomey-Calavi, 1997.
- Adjonou, K. D. O., et al. « Étude de la dynamique spatiale et structure des forêts denses sèches reliques du Togo. » *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 2010, pp. 168–183.
- Agbanou, Brice T. *Dynamique de l'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé*. Thèse de doctorat, Université Toulouse II – Jean-Jaurès et Université d'Abomey-Calavi, 2018.
- Boni, Akilou Bio, Aliou Dicko, Jean Bosco Kpatindé Vodounou, et Armand Kuyéma Natta. « Dynamique de l'occupation du sol et typologie des terres agricoles dans la commune de N'Dali (Bénin). » *ANYASA*, déc. 2015, pp. 20–38.
- Bouko, et al. « Effets de la dynamique d'occupation du sol sur la structure et la diversité floristique des forêts claires et savanes au Bénin. » *Tropicultura*, 2007, pp. 221–227.
- CeRPA. *Résultat campagne agricole de 2000 à 2012 dans la commune de N'Dali*. Parakou, 2012.

- Cohen, J. A. “A Coefficient of Agreement for Nominal Scale.” *Journal of Educational Psychology Measurement*, vol. 20, 1960, pp. 37–46.
- Dahande, Claude Sènahoudji Magloire, et Aser Zinsou Simon Honvo. « Dynamique spatio-temporelle de l’occupation des terres et modélisation prédictive à horizon 2030 au sud du plateau de Sakété. » *DaloGéo*, no. 5, 2021, pp. 67–83.
- Diédhiou, Ibrahima, Catherine Mering, Oumar Sy, et Tidiane Sané. “Teledetection Mapping of Land Cover and Land Use Change.” *EchoGéo*, no. 54, 2020, pp. 1–19.
- Dossou, A. *Cartographie prédictive de l’occupation des terres de la commune de Ouèssè*. Mémoire, Université d’Abomey-Calavi, 2020.
- DSA. *Recensement National de l’Agriculture*. 2018, <https://dsa.agriculture.gouv.bj/section/Recensements/Résultats>.
- Eastman, J. R. *IDRISI Selva*. 2012.
- FAO. *La situation des forêts du monde*. Organisation des Nations Unies pour l’Alimentation et l’Agriculture, 2020.
- Gbaï, I., K. R. Zime, C. Adjire, R. Mitchozounou, et A. Djafarou. *Analyse prospective de la dynamique de l’occupation des terres dans la commune de N’Dali*. 2024.
- Geist, H. J., et E. F. Lambin. “Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation.” *BioScience*, vol. 52, no. 2, 2002, pp. 143–150.
- Gnansounou, P. *Contribution du SIG à l’analyse de la dynamique de l’occupation des terres autour du port sec d’Allada*. Mémoire de licence, 2021.
- INSAE. *Recensement Général de la Population et de l’Habitat*. Institut National de la Statistique et de l’Analyse Économique, 2014.
- Kouhoundji, N. *Évaluation du potentiel agricole du plateau d’Allada*. Thèse de doctorat, Université d’Abomey-Calavi, 2007.
- Lambin, Eric F., et Helmut J. Geist, éditeurs. *Land-Use and Land-Cover Change*. Springer, 2006.
- Lantz, C. A., et E. Nebenzahl. “Behavior and Interpretation of the Kappa Statistics.” *Journal of Clinical Epidemiology*, vol. 49, 1996, pp. 425–431.
- Mensah, S., et al. “Effect of Human Disturbance and Climatic Variability on the Population Structure of *Afzelia africana*.” *South African Journal of Botany*, vol. 95, 2014, pp. 165–173.

- Moumouni, Y. I., O. Arouna, et S. Zakari. *Diversité floristique et structure des formations végétales dans le district phytogéographique du Borgou-Nord*. 2017.
- Moussa, L., I. Yabi, I. T. Imorou, et T. Boukpepsi. *Modélisation de la dynamique des forêts galeries*. 2016.
- Orekan, V., et al. « Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol en zone d'agriculture extensive. » 2018, pp. 22–34.
- Ozer, A., et P. Ozer. « Désertification au Sahel. » *Bulletin des Séances de l'Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer*, vol. 51, no. 4, 2005, pp. 395–423.
- Sidi, I. *Caractérisation des systèmes agroforestiers au Nord-Bénin*. Mémoire de fin de formation, Université de Parakou, 2008.
- Streiner, D. L., et G. R. Norman. *Health Measurement Scales*. 4e éd., Oxford University Press, 1994.
- Tchibozo, É., et al. « Modélisation de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol et analyse des changements du territoire de la Lama au Bénin. » *European Scientific Journal*, vol. 16, no. 6, 2020, pp. 499–524.
- Turner, B. L., E. F. Lambin, et A. Reenberg. "The Emergence of Land Change Science for Global Environmental Change and Sustainability." *PNAS*, vol. 104, no. 52, 2007, pp. 20666–20671.
- Verburg, P. H., et al. "Land Use Change Modelling." *GeoJournal*, vol. 61, no. 4, 2004, pp. 309–324.

**How to cite this article/Comment citer cet article:**

**MLA:** Kouhoundji, Naboua. "Dynamique de l'occupation et de l'utilisation des terres dans les arrondissements de Sirarou et de Gbégourou au Bénin." *Uirtus*, vol. 5, no. 3, December 2025, pp. 433-458, <https://doi.org/10.59384/uirtus.dec2025n21>.