

Modélisation Prospective De L'occupation Du Sol D'un Espace A Forte Pression Anthropique : Cas Du Bassin Versant Du Massili A Gonsé (Burkina Faso)

[Prospective Modelling Of Land Use In An Area Of High Anthropic Pressure: The Case Of The Massili Catchment In Gonsé (Burkina Faso)]

BAGRÉ Mathias Philippe^{1*}, KABORE Omar¹, YAMEOGO Augustin², OUEDRAOGO Wendlassida¹, SOMÉ Yelezoumin Stephane Corenthin¹⁻²,

¹Laboratoire Dynamique des Espaces et Sociétés (LDES)- Université Joseph KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso

²Laboratoire Sciences Humaines (LABOSH)-Université Norbert ZONGO, Koudougou, Burkina Faso, adresse courriel : some_y@yahoo.fr

(*) Correspondance : mathiasbagre3@gmail.com

adresse courriel: mathiasbagre3@gmail.com; oumarkabore@hotmail.com; yamaug8@gmail.com; Wendlassouedraogo@yahoo.fr



Résumé – L'agriculture extensive et l'étalement urbain soulèvent aujourd'hui des questions sur l'évolution des modes d'occupation des terres et leurs effets sur le milieu. L'objectif de la présente étude est d'évaluer les changements dans la dynamique de l'occupation des terres et d'examiner les modifications futures attendues dans le bassin versant du Massili à Gonsé. L'étude s'appuie sur le traitement des images Landsat (1991 ; 2007) et 2019 (référence), les images SRTM 30 m, les types de sols et les données de population. Le logiciel Terrset (*LCM*) a été utilisé pour simuler les changements dans l'occupation des terres (2050). L'analyse des résultats de la simulation montre que sous le scénario « LULC-A », en 2050, les savanes, les champs, les eaux de surface, les formations ripicoles et les champs diminueront de surface respectivement de 57,58 %, 23,57 % ; 21,63 % ; 9 % et 5,70 % alors que l'habitat augmentera de 99 % par rapport à la base (2019). Sous le scénario « LULC-B », en 2050, la modélisation indique que les sols nus, les champs et les eaux de surface diminueront respectivement de 83,76 % ; de 37,03 % ; de 22,90 % alors que les savanes, l'habitat et les formations ripicoles augmenteront respectivement de 166,10 %, de 75,05 % et de 71,63 % par rapport à la référence. Les résultats de cette étude apparaissent donc comme un outil d'aide à la décision dans l'aménagement du territoire.

Mots clés – Bassin versant, Occupation des terres, Modélisation prédictive, Matrice de transition, LCM

Abstract – Extensive agriculture and urban sprawl now raise questions about changes in land use patterns and their effects on the environment. The aim of this study is therefore to assess changes in the dynamics of land use and to examine expected future changes in the Massili basin in Gonsé. The study is based on the processing of Landsat (1991; 2007) and 2019 (reference) images, SRTM 30 m images, soil types and population data. Terrset software (*LCM*) was used to simulate changes in land cover (2050). Analysis of the simulation results shows that under the "LULC-A" scenario, in 2050, savannah, fields, surface water, riparian formations and fields will decrease in area by 57.58 %; 23.57 %; 21.63 %; 9 % and 5.70 % respectively, while habitat will increase by 99 % compared with the baseline (2019). Under the "LULC-B" scenario, in 2050, modelling indicates that bare soil, fields and surface water will decrease by 83.76 %, 37.03 % and 22.90 % respectively, while savannah, habitat and riparian forest will increase by 166.10 %, 75.05 % and 71.63 % respectively, compared with the baseline. The results of this study therefore appear to be a decision-making tool for land-use planning.

Keywords – Catchment, Land use, Predictive modelling, Transition matrix, LCM.

I. INTRODUCTION

La modification de la couverture des terres dans les pays sahéliens devient de plus en plus une préoccupation majeure pour les décideurs. Dans le paysage sahélien, la perte du couvert végétal dans les versants est un fait de l'occupation des sols qui s'est traduite par une extension des aires de cultures aux dépens de la végétation naturelle (Bouzou, 2009). L'évolution régressive du couvert végétal dans les versants trouve son origine dans le surpâturage et l'accroissement démographique (Kambou et Zougmore, 1996, p. 21). Il est certain que l'augmentation de la charge en bétail depuis plusieurs décennies, à la suite de l'augmentation régulière de la population et des progrès en matière de santé animale, est une cause très importante de la dégradation de la végétation. Mais, les agriculteurs passés et présents ont aussi leur part de responsabilité en raison de la fragilité à l'érosion de certains périmètres mis à nu par les défrichements et les sarclages (Toutain, 1977, p. 193).

Au Burkina Faso, comme ailleurs dans les pays sahéliens, la population est à dominance rurale avec des pratiques agropastorales extensives favorables à la dégradation des ressources naturelles. Toutes les régions du pays à l'exception du Centre, où se situe la capitale Ouagadougou sont majoritairement agricoles. La proportion des ménages agricoles dépasse les 90 % dans neuf des treize régions du pays, le plus fort taux étant observé dans celle du Sahel avec un taux de 95,5 % (Herrera et Iboudo, 2012).

Dans le territoire du bassin du Massili à Gonsé, la population a atteint 2 342 371 habitants en 2020, et environ plus de 73 % de cette population vit en ville (Ouagadougou). Par ailleurs, cet espace est aussi caractérisé par la forte concentration des activités socioéconomiques et une agglomération, la capitale Ouagadougou qui occupe environ 14,74 % de la zone d'étude (Bagré et al., 2022, p. 119). Du fait de la présence de la ville de Ouagadougou, le bassin subit des pressions de l'extension urbaine matérialisée par une croissance rapide des quartiers non-lotés. En effet, cette ville a connu des politiques urbaines très diversifiées, des rythmes et des taux de croissance fortement contrastés en termes de grands aménagements, d'infrastructures, d'équipements urbains, de régularisation de la ville spontanée par les lotissements, de « gonflement » exponentiel des fronts d'urbanisation irrégulière (Fournet et al., 2008). Cette situation associée aux différentes pressions agrosylvo-pastorales mettent en péril le cadre physique du bassin versant marqué par une dégradation qui risque de devenir irréversible. Ces conditions sont favorables à l'imperméabilisation des sols des bassins versants entraînant donc une diminution de l'infiltration et une augmentation et une accélération des écoulements, qui accroissent les risques d'inondation tout en diminuant la recharge de la nappe phréatique (Dodane, 2014).

Dans ce contexte, la modélisation anticipative des changements dans la couverture des terres devient un outil d'aide à la décision afin de mieux planifier les différents projets dans l'aménagement du territoire. L'objectif donc de la présente étude est d'évaluer les modifications dans la dynamique de l'occupation des terres et d'examiner les changements futurs sur le bassin du Massili versant à Gonsé. À cet effet, l'outil Land Change Modeler (LCM) du logiciel Terrset a été utilisé pour prédire l'occupation des terres à l'horizon 2050.

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Présentation du bassin du Massili à Gonsé

Le bassin versant du Massili tire son nom de la rivière Massili, l'un des affluents du bassin versant du Nakanbé (Volta Blanche) à sa rive droite. Il prend sa source à 12 km au nord de la ville de Boussé à 53 km de Ouagadougou. Avant Loumbila, le Massili coule à 20 km à l'est de Loumbila-Ouagadougou (Bagré et al., 2022) et il est rejoint par de nombreux affluents temporaires avec le Koulohoko Bandatengakoui comme le plus important (Kaboré/Bontogho, 2015). Cet espace hydrographique couvre 15 communes réparties dans 4 provinces (Kadiogo, Ouhimbira, Kourwéogo et Boulkiemdé) et 3 régions (Centre, Plateau Central et Centre-Ouest). La commune de Pabré est celle qui a la plus grande superficie d'occupation avec un taux de 15,33 % du total de la superficie du bassin versant. Elle est suivie dans l'ordre par les communes de Boussé, Ouagadougou et Dapélogo dont l'emprise sur le bassin atteint respectivement 15,26 %, 14,74 % et 12,65 %. La commune de Siglé est celle qui a la plus faible emprise sur le bassin soit 0,07 % de sa superficie (Bagré et al., 2022).

Le bassin versant du Massili à Gonsé fait partie intégrante du bassin versant du Nakanbé à Wayen. Cet espace hydrographique, limité à la station de Gonsé couvre une superficie de 2 664 km². Dans le bassin versant, les altitudes sont assez faibles et varient de 229 à 394 mètres (Figure 1). L'altitude moyenne est de 311 mètres. Sur le plan pédologique, le substratum est dominé par les sols ferrugineux tropicaux qui occupent plus de 95 % du bassin versant.

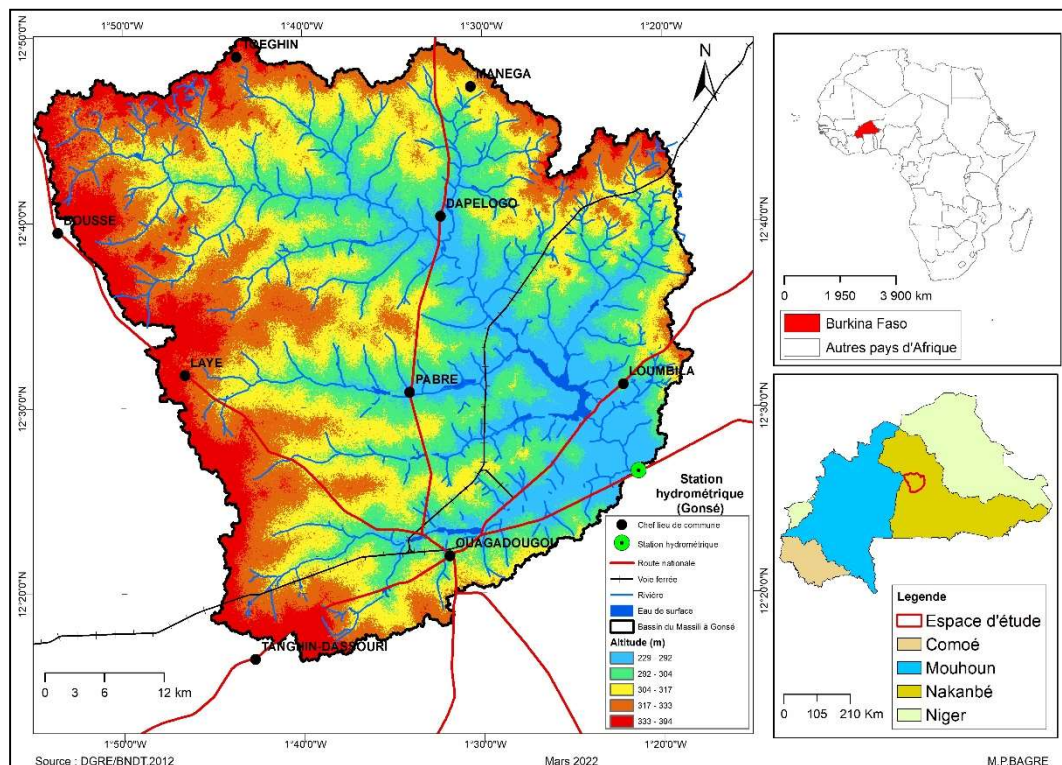


Figure 1 : Carte de situation du bassin versant du Massili à Gonsé

Sur le plan climatique, l'espace d'étude fait partie de la variante septentrionale du climat soudanien, caractérisé par deux saisons bien distinctes : une saison sèche de novembre à mai et une saison humide allant de juin à octobre, c'est la saison des pluies, avec un maximum de précipitations enregistrés en août (Pieyns et Klein, 1964). La moyenne pluviométrique annuelle est comprise entre 600-900 mm/an (Somé, 2014, p. 178). La saison des pluies dure 4 à 5 mois. Dans cet espace, les vents sont relativement faibles et soufflent à une vitesse qui varie entre 1,67 m/s (mois de novembre) et 2,47 m/s (mois de février). La température moyenne mensuelle se situe autour de 28,62°C. Quant aux valeurs maximales, elles oscillent entre 31,15 (mois d'août) à 39,42°C (mois d'avril). L'insolation est forte du fait de la latitude : 12°30' Nord et 14°45' Nord (Bagré et al., 2022, p. 121).

Quant à la végétation, elle est de type classique soudano-guinéen. Elle est caractérisée par diverses formations végétales comprenant des zones de savane arborée, de savane arbustive ou herbeuse (Bagré et al., 2022, p. 121). L'occupation forestière est aussi marquée par les territoires agroforestiers, la présence du parc urbain « Bangr-wéogho » (Ouagadougou) et de quelques plantations privées notamment des arbres fruitiers. Quelques espaces forestiers sacrés signalent la gestion coutumière des ressources naturelles. On dénombre environ une soixantaine d'espaces de bois sacrés, représentés par les *Combretaceae*, les *Mimosaceae*, et des *Cesalpiniaceae* et les *Poaceae*, et des *Fabaceae* pour ce qui est des herbacés (Savadoغو et al., 2011).

Dans cet espace, l'occupation humaine reste importante. La population est estimée en 2020 atteint environ 2 342 371 habitants (INSD, 2017). Chaque commune constitue un pôle de développement urbain. Le secteur agro-sylvo-pastoral constitue une composante déterminante de l'économie dans l'espace d'étude et l'agriculture constitue la principale source de revenus des populations rurales. Elle est caractérisée par des exploitations familiales de lopins de terre avec des techniques culturelles essentiellement traditionnelles voir rudimentaires (culture itinérante sur brûlis, culture attelée, etc.) (Bagré et al., 2023, p. 54). Les activités de maraîchage sont très répandues dans l'espace d'étude. Quant aux activités pastorales, elles sont pratiquées par une forte proportion des ménages, sans qu'il s'agisse d'élevage intensif. En 2019, l'effectif du cheptel en pâture ou dans les fermes a atteint environ 637 822 têtes contre environ 416 837 têtes recensées au cours de l'année 2005 (MRAH/DGEAP, 2019). Au cours de l'année 2019, 50,03 % des 637 822 du cheptel étaient des caprins, 24,75 % d'ovins, 14,59 % des bovins, 7,52 d'asins et 0,11 équins. Sur le plan industriel, la quasi-totalité des zones et des unités industrielles (+90 %) de la commune de Ouagadougou est située dans l'espace d'étude (MCIA/DGESS, 2019).

2.2. Données géospatiales

Les données utilisées pour la présente recherche sont : les images satellitaires Landsat_4, Landsat_5 et Landsat_8 de résolution de 30 m x 30 m, respectivement du 08 janvier, 1991 ; du 28 janvier, 2007 et du 31 décembre, 2019. Ces données ont été téléchargées sur la plateforme du site <https://earthexplorer.usgs.gov/> ; l'image Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de résolution 30 m a été utilisée pour la réalisation du modèle numérique de terrain (MNT). Elles sont libres d'accès sur internet à l'adresse <http://earthexplorer.usgs.gov> ; la Base Nationale de Données Topographiques (BNDT, 2012) du Burkina Faso a été également utilisée. Ces données proviennent de l'Institut Géographique du Burkina (IGB) ; les données sur les sols ont aussi été utilisées et elles proviennent du Bureau National des Sols (BUNASOLS) ; les données de population projection de l'Institut National des Statistiques et de la Démographie (INSD, 2017), la ceinture verte de Ouaga et le Grand Ouaga (Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme) ont aussi été utilisées.

2.3. Méthodes de l'étude

2.3.1. Traitement des images satellitaires Landsat

Le logiciel *ENVI 5.0* a permis de faire le traitement d'images satellitaires. Le traitement des images satellitaires Landsat a commencé par l'intégration de la couche vectorielle donnant les limites de l'espace d'étude. Ensuite, des améliorations radiométriques ont été appliquées aux images afin d'augmenter la lisibilité et de faciliter leur interprétation. Aussi, la nomenclature des objets à cartographier a été identifiée. Ces unités ont été délimitées par une interprétation visuelle sur une composition colorée 432 pour les images de 1991 et 2007 et 543 pour celle de 2019 sur les canaux Rouge, Vert et Bleu. Cette étape a permis de produire des images en couleurs en tenant compte de la signature spectrale des objets. Ce qui permet de distinguer les différents objets présents dans les images et facilite donc l'interprétation de celles-ci. Des aires d'entraînement des unités d'occupation des terres ont été ensuite identifiées pour chaque image. Ce sont des sites représentatifs des caractéristiques numériques des classes qui permettent de définir les signatures spectrales de chaque unité d'occupation du sol. Sur la base des connaissances du terrain, nous avons opté pour la classification supervisée avec l'algorithme « maximum de vraisemblance » ou (Maximum Likelihood) pour produire des fichiers matriciels classifiés comme dans les travaux de Yaméogo, (2021, p. 34). Enfin, après filtration, les images ont été vectorisées sous le logiciel *ArcGis 10.4* afin de disposer des ensembles homogènes d'unités d'occupations des terres. Dans la présente étude, six (06) grands types d'utilisation et de couverture du sol ont été identifiés. Il s'agit des unités mentionnées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Classe des unités d'occupation des terres

• Zone de culture
• Savanes
• Formation ripicole
• Surfaces en eau
• Habitat (zone urbaine et bâtie)
• Zone nue

Source : image Landsat, 1991 ; 2007 et 2019

2.3.2. Détection des changements intervenus dans les classes d'occupation du sol

Afin d'évaluer le niveau de la précision de la classification supervisée, des indicateurs statistiques sont calculés. Il s'agit de la matrice de confusion et l'indice Kappa. La matrice de confusion permet d'évaluer la précision globale de la cartographie et les résultats de la classification supervisée en donnant les valeurs issues des erreurs de commission (de rajout ou de surplus) de classification et des déficits ou d'exclusion de quantité dans la classification (Kiansi et al., 2021, p. 100). Alors que l'indice Kappa est utilisé pour évaluer la matrice de confusion, exprimant l'accord entre les résultats obtenus (carte) et la vérité sur le terrain. Cet indice s'étend de 0 à 1. Il se divise en cinq catégories : accord très faible (de 0 à 0,20) ; accord faible (de 0,21 à 0,40) ; accord modéré (de 0,41 à 0,60) ; accord substantiel (de 0,61 à 0,80) et accord presque parfait (de 0,81 à 1). Le calcul de l'indice Kappa

est donné par la formule (1), celui de la précision globale observée par la formule (2) et celui de la précision prévue par la formule (3) (Chalifoux et al., 2006, p. 12, 13).

$$\hat{K} = \frac{a-b}{1-b} \quad (1) \quad A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{NC} x_{ii} \quad (2) \quad b = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{NC} (x_{+i}x_{i+}) \quad (3)$$

Nc=nombre de classes ; N=Nombre total d'observation ; x_{ii} = nombre d'observations dans la colonne i ligne i (diagonale de la matrice) ; x_{+i} =total des observations dans la colonne i (total à droite dans la matrice), et x_{i+} = total des observations dans la ligne i (total en bas de la matrice).

2.3.3. Quantification des changements intervenus entre 1991 à 2007

L'évolution spatio-temporelle des unités d'occupation du sol a été quantifiée entre les années 1991-2007. Cet exercice permet d'observer sur une unité d'occupation du sol, les « gains », les « pertes » et les « espaces qui sont restés stables » au cours de la période (1991-2007). Pour ce faire, une matrice de transition a été mise en place afin d'identifier les fréquences de transition entre les unités d'occupation du sol. Ce qui a permis de calculer le taux de changement des unités d'occupation du sol sur la période 1991-2007. La formule utilisée est celle de Oloukoi, (2013, p. 4) dans son article sur la modélisation des changements d'occupation du sol au Bénin et de Kpedenou et al., (2016, p. 144) dans ses travaux sur la quantification des changements de l'occupation du sol dans la préfecture de Yoto, au sud-est du Togo. Les variables considérées sont la superficie d'une unité d'occupation du sol (S) et les dates de début et de fin de la période d'analyse représentées par t_1 (1991) et t_2 (2007). Le taux de changement est obtenu par les formules (4) et (5). La formule (4) permet d'extraire le taux de changement moyen annuel (TC) et la formule (5) permet de calculer le taux de changement global (TG).

$$TC = \frac{\ln S_2 - \ln S_1}{(t_2 - t_1) \times (\ln e)} \times 100 \quad (4) \quad TG = \frac{S_B - S_A}{S_A} \times 100 \quad (5)$$

La classe d'occupation durant la période d'analyse est considérée stable si $TG = 0$; elle gagne en superficie quand $TG > 0$ et perd de surface d'occupation pour $TG < 0$.

2.3.4. Simulation de l'occupation des terres à l'horizon 2019-2050

L'article fait une évaluation prédictive des changements de l'utilisation des terres sur le bassin versant du Massili à Gonsé à l'horizon 2050. Dans la présente étude, deux hypothèses de travail sont formulées. Il s'agit de :

- **Scénario de « la continuité » appelé Land Use and Land Cover-A (LULC-A)**

C'est une hypothèse basée sur le prolongement des tendances historiques de l'occupation des terres sur le bassin versant du Massili à Gonsé entre 1991 à 2007 sans vraiment trop de contraintes réglementaires. Dans ce scénario, aucune mesure n'est prise pour limiter la tendance historique des classes d'occupation du sol. La zone urbaine et bâtie continue d'augmenter particulièrement avec l'étalement horizontal de la ville de Ouagadougou, l'expansion des surfaces agricoles, des sols nus. Les populations sont de plus en plus dépendantes vis-à-vis des ressources naturelles dans ce scénario (sans politiques environnementales). Une situation à l'origine de la baisse des savanes et des formations ripicoles. Cette hypothèse tient compte des fréquences de transition entre les classes d'occupation des terres sur la période 1991-2007.

- **Scénario « protection environnementale » appelé Land Use and Land Cover-B (LULC-B)**

C'est une hypothèse inscrite sur l'action publique environnementale. Sous cette hypothèse, « protection environnementale », des mesures sont prises par les pouvoirs publics à travers des politiques environnementales afin de restaurer et conserver l'environnement. C'est dans ce sens que des mesures barrières sont prises afin de réduire la dégradation de l'environnement et améliorer le cadre de vie des populations dans le bassin versant. Ces actions peuvent se traduire par une meilleure prise en compte des questions environnementales dans les documents d'urbanisme, la volonté de rupture avec l'étalement urbain, le maintien des zones forestières et des actions de reboisement, la restauration de la ceinture verte de Ouagadougou, le respect de la bande de servitude, de l'agriculture extensive à semi-intensive/intensive et l'augmentation du niveau de vie des populations. Ce sont des mesures entreprises pour freiner les atteintes à l'environnement en relation avec les réalités observées entre les années 1991 et 2007.

2.4. Procédures de la modélisation prospective de l'occupation du sol

Ces dernières décennies ont été marquées par un environnement technologique et scientifique favorable au développement des modèles dans le domaine de l'occupation et de l'utilisation des terres. Ces outils de modélisation ont été développés avec des avantages et des limites comparatifs. Le choix du logiciel tient compte de son environnement, mais aussi des besoins de recherche en conformité avec les objectifs visés par l'utilisateur (Kaboré, 2013, p. 118). Dans le présent travail, l'outil d'analyse *Land ChangeModeler (LCM)* intégré dans le logiciel *TerrSet*, développé par Clark Labs (2009) à l'Université Clark, aux États-Unis a été retenu. C'est un logiciel d'analyse et de prédiction des changements d'occupation des terres. Le modèle s'appuie sur les connaissances passées et actuelles de l'occupation des terres afin de faire des prédictions sur le futur (Agbanou et al., 2018, p. 253). Il a été largement utilisé et approuvé dans de nombreux travaux scientifiques comme ceux de Kaboré, (2013, p. 119) sur la dynamique de l'utilisation des terres dans les écosystèmes de savane et systèmes agraires du bassin versant de la Kompienga, au Burkina Faso, Agbanou, (2018, p. 251) dans son étude sur la modélisation des changements d'occupation des terres en région soudanienne au nord-ouest du Bénin et Mishra et al., (2014, p. 114) pour la prédiction des changements d'utilisation des terres basée sur le LCM en Muzaffarpur, en Inde. Par ailleurs, la mise en œuvre du logiciel *LCM* nécessite une bonne préparation des données à utiliser. Ces données peuvent être regroupées en deux grandes catégories. Il s'agit des données formées de variables dépendantes comme les unités d'occupation des terres à différentes dates, et des données constituées par des variables explicatives (Kaboré, 2013, p. 119).

Pour ce qui est des variables explicatives, dans le présent travail, elles sont constituées de : la pente, l'altitude, les sols, les agglomérations, les distances aux localités, aux champs et aux ressources en eau, les espaces de forêt, les routes, les surfaces en eau, la bande verte, les localités et la densité de la population. Toutes ces données ont été formatées en format *raster *.img* sous *Argis 10.4* de telle sorte qu'elles aient un système de référence cohérent, des légendes identiques, les mêmes nombres de lignes et de colonnes, des étendues spatiales et de pixel cohérent. Ces modalités sont requises pour une superposition parfaite des données pour le bon fonctionnement du logiciel. Par ailleurs, les données d'occupation des terres des périodes 1991 et 2007 ont été aussi converties en format raster de sorte à présenter le même ordre des classes d'occupation des terres et de légende identique. L'ensemble de ces données d'entrée ont été par étape introduite dans le logiciel *Terrset (LCM)* et trois principaux modules de l'outil d'analyse LCM ont été retenus pour la mise en œuvre (Figure 2).

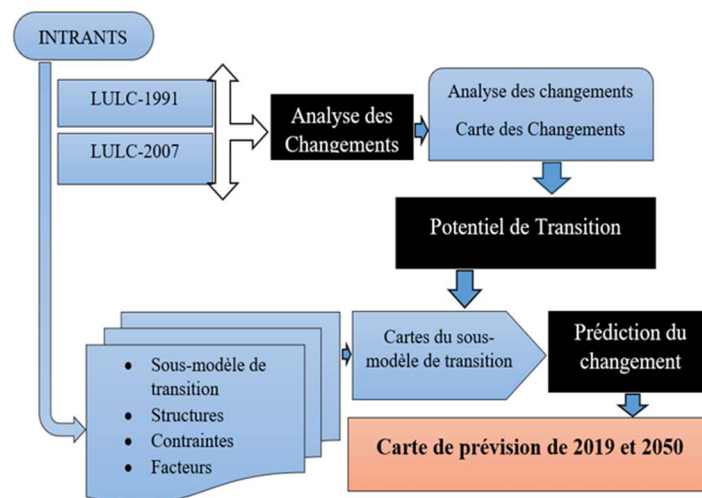


Figure 2 : Méthode de modélisation sous le LCM

- Module d'analyse des changements

Cet outil permet de faire l'analyse des deux couches historiques d'occupation du sol. Dans cette étude, le projet de modélisation a été défini en utilisant les cartes des unités d'occupation du sol des années 1991 et 2007. L'utilisation de ces données connues est considérée comme la phase de calibration du modèle. Cette étape permet de comptabiliser les changements intervenus au cours de la période historique (de 1991 à 2007) en termes de gains, de pertes, de stabilité et une mise au point des contributeurs à chaque transition. Et c'est à partir des transitions observées intégrant les variables explicatives que des projections de l'occupation futures du sol ont été effectuées.

- Module de potentiels de transition

À cette étape, en utilisant des couches historiques de l'occupation du sol des années 1991-2007 ainsi que l'ensemble de variables explicatives potentielles citées plus haut, le LCM utilise des outils de modélisation empirique pour établir la relation entre elles.

- Prédiction des changements

Sur la base de potentiel de transition, LCM utilise l'analyse de la chaîne de Markov pour projeter la quantité de changement attendue et un modèle d'allocation compétitive des terres. Cette procédure détermine exactement la quantité de terre qui devrait passer de la date ultérieure à la date prévue, en se basant sur une projection des potentiels de transition dans le futur et crée un fichier de probabilités de transition. Ce fichier est une matrice qui enregistre la probabilité que chaque catégorie de couverture terrestre passe à une autre catégorie (Mishra et al., 2014, p. 121). La chaîne de Markov produit des matrices de transition ainsi qu'une matrice d'espaces de transition. De là, le scénario d'occupation du sol peut être projeté pour l'année 2019. Cette projection en 2019 sera confrontée à l'occupation du sol de l'année 2019 (période de référence) issue du traitement de l'image Landsat-2019 pour une validation des résultats avant toute projection future à l'horizon 2050.

III. RÉSULTATS

3.1. Validation des classifications et résultat cartographique

Le traitement des images Landsat des années 1991 et 2007 montre une précision globale de 99,22 % avec un indice Kappa de 0,99 % pour l'image de 1991 et elle atteint 98,89 avec un indice Kappa de 0,98 pour celle de 2007. Ces résultats indiquent que les indices Kappa sont tous en accord presque parfait, car ils sont compris entre 0.81 à 1. Les tableaux 2 montrent la matrice de confusion des images Landsat 1991-2007, la précision globale et l'indice Kappa.

Tableau 2 : Matrice de confusion des images Landsat 1991 et 2007

1991						
Unités	Eau	Champs	Habitat	Zone nue	Savane	FR
Eau	99,4	0	0	0	0	0
Champs	0	99,34	0	1,69	1,02	0
Habitat	0,6	0	100	0	0	0
Zone nue	0	0,57	0	98,31	0	0
Savane	0	0,09	0	0	98,55	1,69
FR	0	0	0	0	0,43	98,31
Total	100	100	100	100	100	100
Précision Globale (99,23 %)				Indice Kappa (0,99)		
2007						
Unités	Eau	Champs	Habitats	Zone nue	Savane	FR
Eau	100	0	0	0	0	0
Champs	0	99,43	0	5,45	0,41	0
Habitat	0	0	99,74	0	0	0
Zone nue	0	0	0,13	94,55	0	0
Savane	0	0	0	0	99,59	0,2

FR	0	0,57	0,13	0	0	99,8
Total	100	100	100	100	100	100
Précision Globale (98,89 %)			Indice Kappa (0,98)			

FR : Formation ripicole

Le traitement des images Landsat a permis de réaliser les cartes d'occupation du sol de la période d'analyse 1991-2007 (Figure 3).

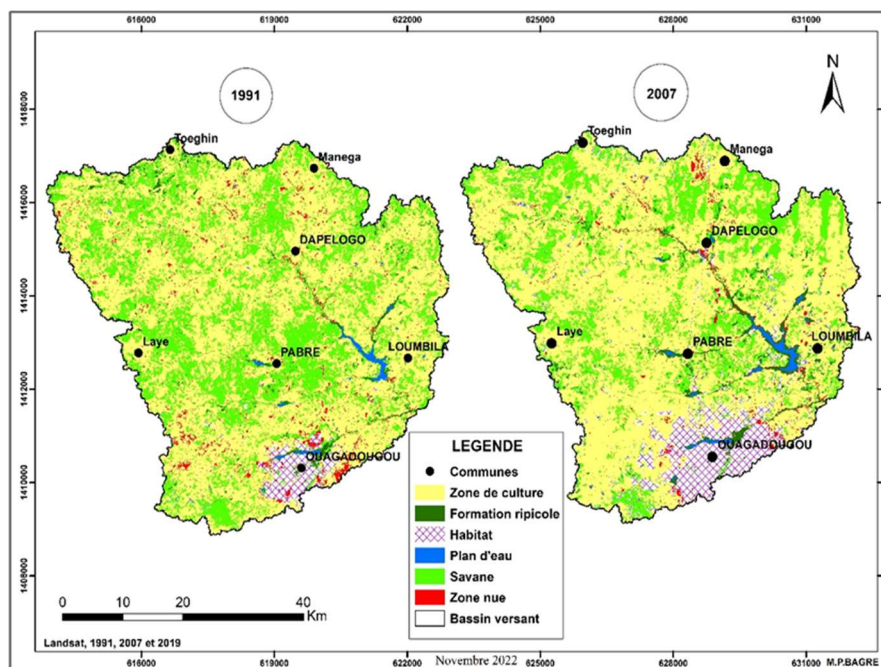


Figure 3 : Occupation du sol des années 1991 et 2007 sur le bassin du Massili à Gonsé

3.2. Dynamique de l'occupation des terres entre les années 1991 et 2007

Le tableau 3 donne l'évolution des unités d'occupation du sol entre les années 1991 et 2007.

Tableau 3 : État de l'occupation du sol sur le bassin du Massili à Gonsé entre 1991-2007

Unités d'occupation des terres	1991		2007	
	Superficie (km ²)	(%)	Superficie (km ²)	(%)
Zone de culture	1636,67	61,44	1741,27	65,36
Formation ripicole	53,48	2,01	82,82	3,11
Habitat (Zone urbanisée et bâtie)	72,37	2,72	248,08	9,31
Plan d'eau	13,56	0,51	18,42	0,69
Savane	825,85	31,00	539,67	20,26
Zone nue	62,07	2,33	33,74	1,27

L'analyse du tableau 3 montre qu'en 1991, le bassin versant du Massili à Gonsé était une zone dominée par les terres agricoles et les savanes avec des superficies respectives de 1636,67 km² (61,44 %) et 825,85 km² représentant 31 % de l'espace d'étude. La zone urbanisée et bâtie occupait quant à elle 72,36 km² soit 2,72 % ; les zones nues avec environ 62,07 km² soit un taux de

couverture de 2,33 %, la formation ripicole de l'ordre de 53,48 km² représentant un pourcentage de 2,01 % et les plans d'eau 12,94 km² soit un taux de couverture de 0,51 %.

En 2007, la zone de culture et la savane continuent de dominer les autres classes d'occupation du sol avec des superficies respectives de 1741,27 km² (65,36 %) et 539,67 km² (20,26 %). L'espace d'occupation restante est partagé entre la zone urbanisée et bâtie avec une superficie de 248,08 km² (9,31 %), la formation ripicole occupant environ 82,82 km² (3,11 %), les zones nues représentant 33,74 km² (1,27 %) et les plans d'eau occupant environ 18,42 km² soit 0,69 %.

3.3. Tendances observées sur l'évolution des classes d'occupation des terres entre 1991 et 2007

Sur la période 1991-2007, l'analyse de l'évolution des unités d'occupation du sol dans l'espace d'étude montre que 66,67 % des classes d'occupation ont connu une augmentation de leur superficie (Figure 4).

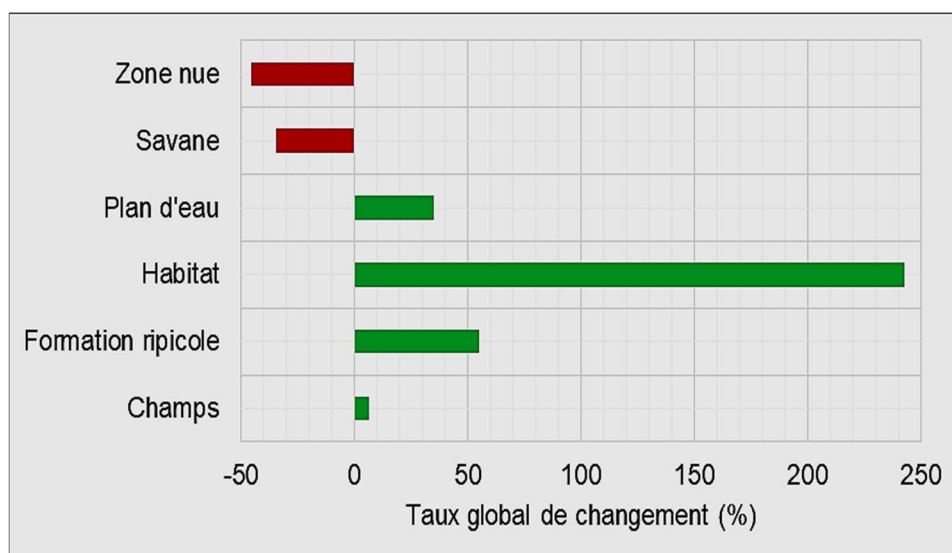


Figure 4 : Changements observés dans les classes d'occupation du sol (1991-2007)

Des modifications majeures de la couverture terrestre ont été enregistrées sur l'habitat et la zone de formations ripicoles. En effet, la zone urbanisée et bâtie a gagné environ 175,71 km² de surface représentant une hausse de l'ordre de 242,79 %, la formation ripicole de 28,96 km² soit une augmentation de 54,73 % et les plans d'eau de 4,86 km² correspondant à un taux de 35,84 %. Des changements mineurs ont été observés sur les unités d'occupation du sol « Champs » avec une valeur de 104,6 km² soit une augmentation de 6,39 %. Durant cette même période d'analyse, les savanes et les sols nus ont subi des pertes significatives. En effet, les savanes ont subi une perte de surface de 286,18 km² soit une régression de (-34,65 %). Quant à la l'unité d'occupation « Zone nue », la baisse a atteint 28,33 km² soit un taux de variation de (-45,64 %) (Tableau 4).

Tableau 4 : Taux de conversion des classes d'occupation du sol

Unité d'occupation du sol	Superficie en km ²		TG (%)	TC (%)
	1991	2007		
Champs	1636,67	1741,27	6,39	0,39
Formation ripicole	53,48	82,82	54,73	2,73
Habitat	72,37	248,08	242,79	7,70
Plan d'eau	13,90	18,76	34,96	1,88
Savane	825,85	539,67	-34,65	-2,66
Sol nu	62,07	33,74	-45,64	-3,81

3.4. Détection des types de changements des classes d'occupation du sol entre 1991 et 2007

Le tableau 5 présente les résultats de la matrice des transitions qui résume la probabilité de passage d'un usage du sol à un autre entre la période 1991 et 2007 sur le bassin du Massili à Gonsé. Il ressort de l'examen des résultats qu'environ 1275,74 km² des surfaces agricoles (47,88 %), 332,78 km² des zones de savanes correspondant à 12,49 %, 61,57 km² de l'habitat soit l'équivalent de 2,31 %, 16,93 km² de la formation ripicole (0,64 %), 13,24 km² des surfaces en eau (0,49 %) et 11,57 km² des sols nus (0,43 %) sont restés inchangés entre 1991-2007. Ce qui fait environ 1711,83 km² (64,26 %) de classes d'occupation restées stables.

Entre 1991 et 2007, des processus de transformation des classes d'occupation du sol en d'autres classes ont été observés (Figure 5). En effet, les champs ont gagné environ 465,54 km² (17,47 %) de superficie au détriment de la savane de l'ordre de 420,77 km² (15,79 %), la zone nue de 32,95 km² (1,24 %), la formation ripicole de 7,16 km² (0,27 %) et de l'habitat de l'ordre de 4,64 km² (0,17 %). Au même moment, la savane a gagné 206,9 km² (7,77 %) de superficie au détriment de la classe des champs avec 179,37 km² (6,73 %), des formations ripicoles avec 23,44 km² (0,88 %), de l'habitat avec 2,25 km² (0,08 %) et des zones nues de l'ordre de 1,81 km² (0,07 %). Quant à l'habitat, elle a gagné en superficie de l'ordre de 186,51 km² (7 %) au détriment de 138 km² (5,18%) des champs, 28,61 km² (1,55%) des savanes, 15,07 km² (0,57 %) des zones nues et 4,67 km² (0,18%) des formations ripicoles. Pour les formations ripicoles, elles ont gagné 65,79 km² de superficie auprès des champs d'environ 21,74 km² (2,47 %), des savanes avec 41,3 km² (1,55 %), de l'habitat avec 1,95 km² (0,07), des zones nues sur 0,58 km² (0,02) et des surfaces en eau avec 0,22 km² (0,01 %). Ces transformations ont été enregistrées sur les zones nues qui ont gagné pendant cette période d'analyse environ 22,17 km² (0,83 %) de superficie au désavantage des champs avec 20,34 km² (0,76%), des savanes de valeur 1,52 km² (0,06 %) et de l'habitat de l'ordre de 0,21 km² (0,01 %). Ces modifications ont été observées sur l'unité d'occupation « Plan d'eau » qui a bénéficié d'environ 5,32 km² (0,2 %) au préjudice des champs, des formations ripicoles, de l'habitat, des savanes et des sols nus.

Tableau 5 : Matrice de transition des classes d'occupation du sol dans le bassin versant du Massili à Gonsé entre 1991-2007

Unité	Champs	FR	Habitat	Plan d'eau	Savane	Zone nue	Total 2007
Champs	47,89	0,27	0,17	0,00	15,79	1,24	65,36
FR	0,82	0,64	0,07	0,01	1,55	0,02	3,11
Habitat	5,18	0,18	2,31	0,00	1,07	0,57	9,31
Plan d'eau	0,05	0,04	0,07	0,50	0,03	0,00	0,69
Savane	6,73	0,88	0,08	0,00	12,49	0,07	20,26
Zone nue	0,76	0,00	0,01	0,00	0,06	0,43	1,27
Total_1991	61,44	2,01	2,72	0,51	31,00	2,33	100

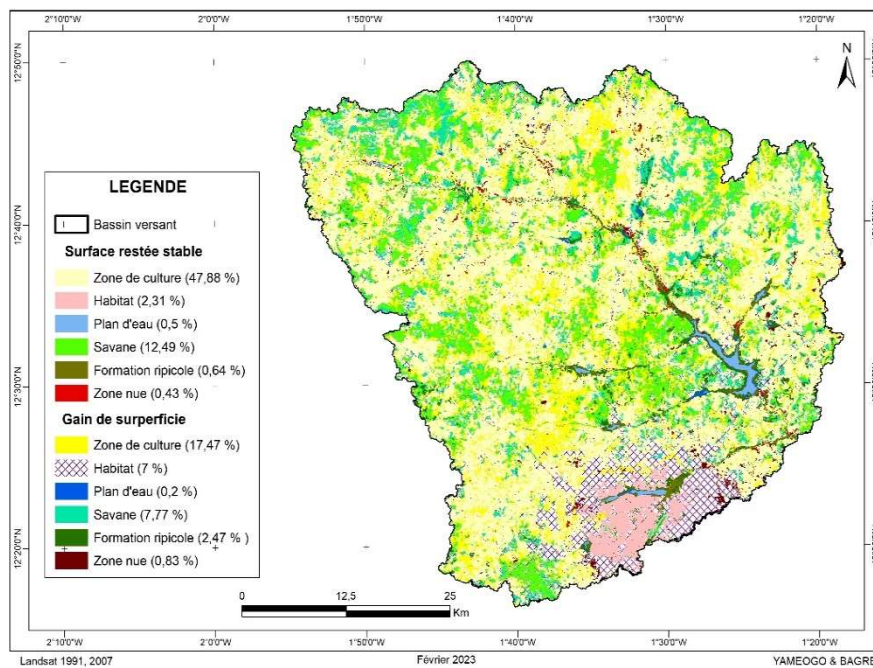


Figure 5 : Carte de changements des classes d'occupation du sol entre 1991-2007

3.5. Projection de l'occupation des terres dans le bassin versant à l'horizon 2050

3.5.1. Validation de l'outil de projection Land Change Modeler (LCM)

La modélisation de l'occupation des terres à l'horizon 2050, a nécessité au préalable une validation du modèle LCM. En effet, une projection a été faite à l'horizon 2019 afin de valider le modèle Land Change Modeler. Le coefficient de Cramer's et l'indice Kappa ont été utilisés pour évaluer la précision globale des résultats de projection. Pour ce qui est du coefficient de Cramer's, Aldwaik, et Pontius (2013), ont indiqué que les coefficients de Cramer's varient de 0 (pas de corrélation) à 1 (corrélation parfaite). Les valeurs de l'indice Kappa sont excellentes pour des valeurs supérieures à 0,75 (soit 75 %) ; bonnes pour des valeurs comprises entre 0,40 et 0,75 (40-75 %) ; et mauvaises pour les valeurs inférieures à 0,40 (40 %) (Sylla et hauhouot, 2016).

Dans la présente recherche, la corrélation globale donnée par le coefficient de Cramer's atteint une valeur de l'ordre de 0,61 tandis que l'indice Kappa atteint une valeur de l'ordre de 0,742 soit 74,2 %, ce qui indique que la précision est bonne. Les résultats de la modélisation de l'occupation des terres à l'horizon 2019 et les résultats de traitement de l'image Landsat 2019 sont consignés dans le tableau 6 et la figure 6 ci-dessous. Les résultats de projection montrent que par rapport à la période de base (2019), la zone de culture, les plans d'eau, les savanes et les sols nus ont respectivement gagné de superficie de (+39,37 km²) ; (+4,73 km²) ; (+27,73 km²) et (+23,6 km²). Par contre, la zone urbanisée et bâtie et les formations ripicoles ont perdu respectivement de surface de l'ordre (de -60,03 km²) et (de -36,11 km²) de leur superficie par rapport à la période de référence.

Tableau 6 : Validation du projet de modélisation sous le modèle LCM

Classes d'occupation des terres	Superficie (km ²) - Image Landsat 2019	Superficie projetée (km ²) 2019	Gain/Perte (km ²) 2019
Zone de culture	1897,37	1858	39,37
Formation ripicole	46,67	82,78	-36,11
Zone urbanisée et bâtie	314,07	374,1	-60,03
Plan d'eau	23,49	18,76	4,73

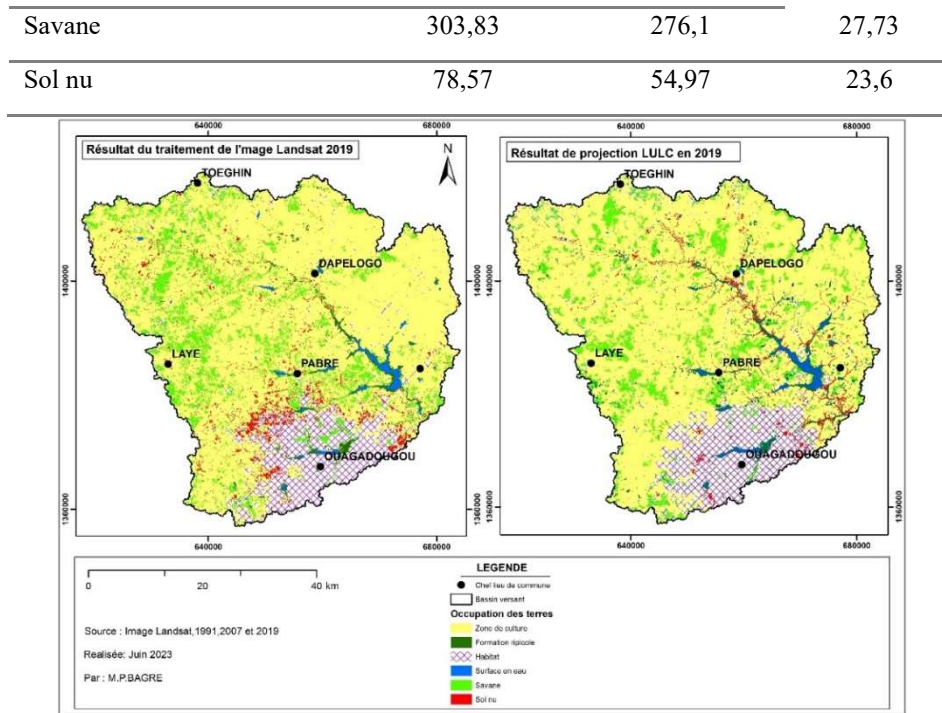


Figure 6 : Classes d'occupation des terres projetées en 2019 comparées à l'occupation des terres de référence « 2019 ».

3.5.2. Utilisation et couverture du sol à l'horizon 2050 sous l'hypothèse LULC-A et LULC-B

Le tableau 7 et la figure 7 montrent les résultats de la modélisation de l'occupation des terres attendue à l'horizon 2050 sur le territoire du bassin du Massili à la station de Gonsé.

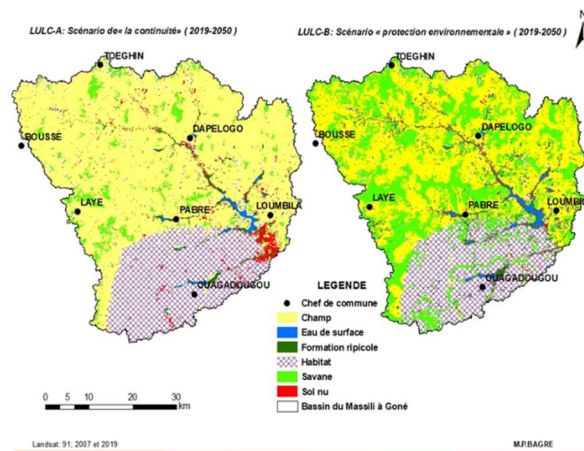


Figure 7 : Occupation du sol sous les deux scénarios sur le bassin du Massili en 2050

- Hypothèse de « La continuité », le « LULC-A »

Sous le scénario de « La continuité », les résultats de la modélisation à l'horizon 2050 montrent que le territoire du bassin versant du Massili à Gonsé sera principalement sous l'emprise des terres agricoles avec une surface d'occupation de 1789,2 km² représentant un taux de 67,16 % et de la zone urbaine et bâtie avec une superficie d'occupation de 624,99 km² correspondant à un taux de l'ordre de 23,46 % (Tableau 7). Ces deux classes occupent environ 2414,1 km² soit plus de 90 % de la superficie de l'espace d'étude. Pour ce qui est des autres unités, la savane tient 128,88 km² correspondant à 4,84 %, la zone nue détient 60,05 km² soit un taux de 2,25 %, la formation ripicole contrôle environ 42,47 km² représentant 1,59 % et la surface en eau garde les 18,41 km² soit un taux de 0,69 %.

Tableau 7 : Occupation des terres dans le bassin du Massili à Gonsé en 2050

Classe d'occupation du sol	« LULC-A »	%	« LULC-B »	%
Champ (km ²)	1789,2	67,16	1194,77	44,85
Formation ripicole (km ²)	42,47	1,59	80,1	3,01
Habitat (km ²)	624,99	23,46	549,77	20,64
Eau de surface (km ²)	18,41	0,69	18,11	0,68
Savane (km ²)	128,88	4,84	808,49	30,35
Zone nue (km ²)	60,05	2,25	12,76	0,48
Total	2664	100	2664	100

• Hypothèse « Protection environnementale », le « LULC-B »

Sous le scénario « Protection environnementale », les résultats de la simulation montrent que le bassin versant du Massili à Gonsé sera majoritairement occupé par la zone de culture qui détient environ 1194,77 km² correspondant à un taux de 44,85 %, la savane avec 808,49 km² soit un taux de 30,35 % et l'habitat qui contrôle environ 549,77 km² soit un pourcentage de 20,64 % de la superficie de l'espace d'étude. La surface d'occupation restante est partagée entre la formation ripicole avec 80.1 km² (3,01 %), les surfaces en eau avec 18,11 km² (0,68 %) et les zones nues avec 12,76 km² (0,48 %).

3.6. Impact du prolongement des tendances historiques de l'occupation du sol sur le bassin du Massili à Gonsé à l'horizon 2050 par rapport à la période de référence

À la lecture du tableau 8 et de la figure 8, les résultats de la modélisation montrent que sous le scénario de la continuité « LULC-A », la zone des savanes, les zones nues, les eaux de surface, la formation ripicole et les zones de culture diminueront de superficie respectivement de -174,95 km² (-57,58 %), de -18,52 km² (-23,57 %), de -5,08 km² (21,63 %), de -4,2 km² (-9,00 %), de -108,17 km² (-5,70) d'ici à 2050 par rapport à la période de référence (2019). La zone urbaine et bâtie par contre augmentera de surface d'environ 310,92 km² représentant un taux d'augmentation de l'ordre de +99 % par rapport à la situation de référence (2019).

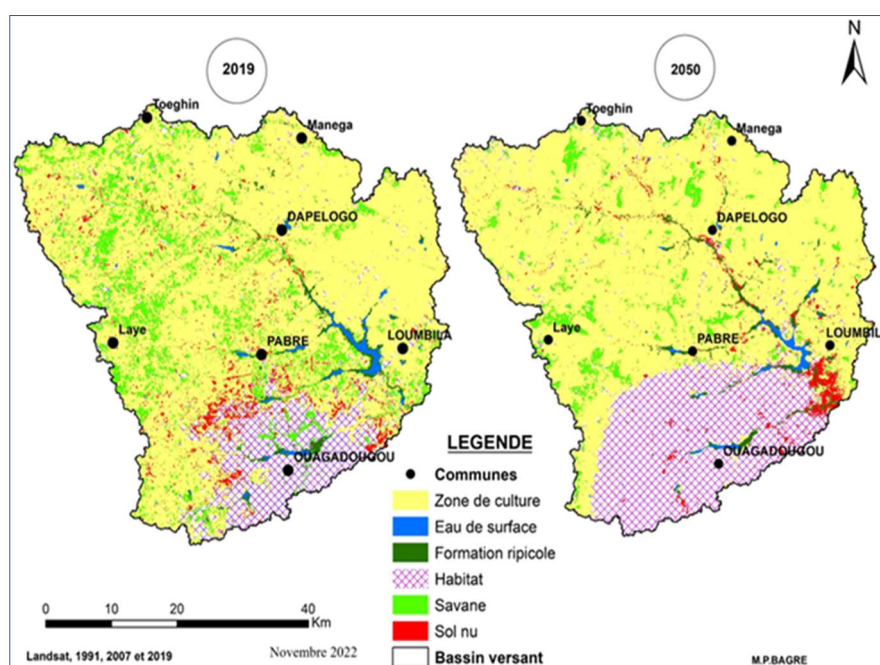


Figure 8 : Tendance observée entre les données d'observation (2019) et le scénario sans politiques environnementales (2050)

Tableau 8 : Occupation du sol « LULC-A » à l'horizon 2050 par rapport à la période de référence (2019)

Unités d'occupation du sol	LULC-2019	« LULC-A »	Gain/perte (km ²)	Gain/perte (%)
Champ (km ²)	1897,37	1789,2	-108,17	-5,70
Formation ripicole (km ²)	46,67	42,47	-4,2	-9,00
Habitat (km ²)	314,07	624,99	310,92	+99,00
Eau de surface (km ²)	23,49	18,41	-5,08	-21,63
Savane (km ²)	303,83	128,88	-174,95	-57,58
Zone nue (km ²)	78,57	60,05	-18,52	-23,57

3.7. Impact des mesures « protection environnementale » sur l'occupation du sol à l'horizon 2050 par rapport à la période de référence

Pour ce qui est du scénario « protection environnementale » « LULC-B » marquée par la mise en œuvre des politiques environnementales, comme indiqué dans le tableau 9 et figure 9 ci-dessous, les résultats de la simulation montrent que les savanes, l'habitat et les formations ripicoles augmenteront de superficie respectivement de l'ordre de 504,66 km² (+166,10 %), de 235,7 km² (+75,05 %) et de 33,43 km² (+71,63 %) par rapport à la période de base (2019). Quant aux autres unités d'occupation du sol, les résultats de la modélisation annoncent qu'elles diminueront de superficie. Il s'agit des zones nues avec une variation de superficie de -65,81 km² (-83,76 %), les zones de culture avec une perte de -702,6 km² (-37,03 %) et l'unité d'occupation du sol « plan d'eau » dont la perte attendue est de -5,38 km² (-22,90 %). Dans ce scénario, les savanes ont gagné de manière très significative de superficie et la zone de culture a connu une baisse considérable.

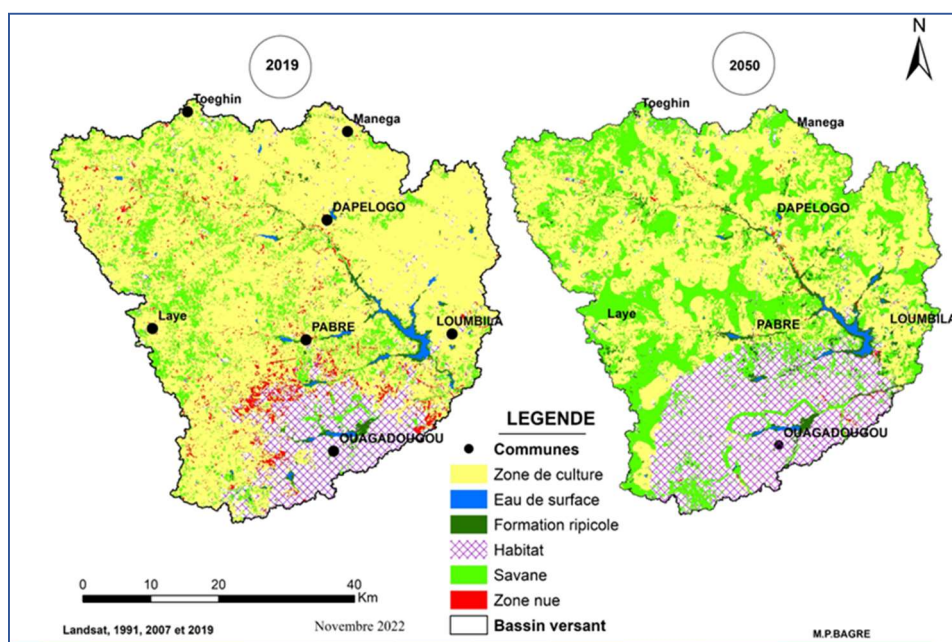


Figure 9 : Tendances observées entre les données d'observation (2019) et le scénario avec politiques environnementales (2050)

Tableau 9 : Occupation du sol « LULC-B » à l'horizon 2050 par rapport à la période de référence (2019)

Unités d'occupation du sol	LULC-2019	« LULC-B »	Gain/perte (km ²)	Gain/perte (%)
Champ (km ²)	1897,37	1194,77	-702,6	-37,03
Formation ripicole (km ²)	46,67	80,1	33,43	+71,63
Habitat (km ²)	314,07	549,77	235,7	+75,05
Eau de surface (km ²)	23,49	18,11	-5,38	-22,90
Savane (km ²)	303,83	808,49	504,66	+166,10
Zone nue (km ²)	78,57	12,76	-65,81	-83,76

IV. DISCUSSIONS

Dans cette étude, la démarche méthodologique adoptée pour évaluer la tendance des classes d'occupation du sol sur la période historique (1991 et 2007), repose sur le traitement des images Landsat de résolution 30 m. Les résultats obtenus de la classification supervisée sont tous en accord presque parfait avec des indices Kappa compris entre 0.81 à 1 comme mentionné dans les travaux de Chalifoux et al., (2006, p. 12). L'analyse des résultats montre que les classes d'occupation du sol sur le bassin versant du Massili à Gonsé ont subi de fortes dégradations durant la période d'analyse. En effet, le taux de changement global révèle une évolution progressive pour les classes de l'habitat, de la zone de culture, des formations ripicoles et de la surface en eau tandis que la savane et les sols nus ont diminué, comme l'a démontré l'étude. Ces résultats sont en accord avec ceux de Gbohoui, (2021, p. 63) sur les bassins emboîtés du Nakanbé au Burkina Faso et de Mahé et al., (2010, p. 5) dans leur article sur l'impact climatique et anthropique dans les tendances des écoulements du Nakanbé, au Burkina Faso. Pour ces auteurs, les terres agricoles, l'habitat et les zones nues ont augmenté de superficie, ce qui a affecté les zones de savane qui ont perdu de surface. Kabore/Bontogho, (2015, p. 37) a démontré qu'il y a une forte dégradation du couvert végétal dans le bassin du Massili à Gonsé entre les périodes 1990 ; 2002 et 2013. Selon les résultats, la savane arbustive est passée de 69 % à 36 % entre 1990-2002. Au même moment, l'agriculture/la jachère qui occupait 22 % des terres en 1990 a connu une hausse pour atteindre 54 % tandis que la forêt galerie a été réduite à 1 %. Mais, en 2013, la superficie consacrée à la forêt galerie a connu une hausse de 4 % contre 3 % pour l'agriculture/jachères et l'habitat.

La modélisation anticipative de l'occupation du sol à l'horizon 2019 sur le bassin du Massili à Gonsé a permis de valider le modèle *LCM* avec les données d'observation de 2019. Les résultats des simulations des deux scénarios d'occupation du sol ont montré des impacts différenciés sur l'évolution des classes d'occupation du sol en 2050. La simulation effectuée sur la base du maintien des tendances passées révèle qu'une telle situation a pour conséquence, la réduction des savanes, des zones nues, des surfaces en eau, des formations ripicoles et des zones de culture au profit de l'habitat qui a connu une hausse très significative. Ces résultats sont similaires à ceux de Agbonou, (2018, p. 258) ; Kaboré, (2013, p. 201) et Oloukoi, (2013, p. 315). Pour ces auteurs, le manque ou le non-respect des politiques environnementales est à l'origine d'une tendance à la baisse des zones de savanes et formations ripicoles au profit de l'augmentation des « zones urbaines et bâties », des terres agricoles et des sols nus dans les bassins d'étude. Les résultats de la simulation en 2050 montrent également que le scénario basé sur la protection environnementale aura pour effet, l'augmentation de la superficie des classes de savanes, l'habitat, les formations ripicoles tandis que les zones de cultures, les sols nus et les eaux de surface vont diminuer de surface d'occupation par rapport à la période de référence (2019). Ces résultats corroborent ceux de Kaboré, (2013) qui a appliqué le modèle (*LCM*) sur le bassin versant de la Komienga (Burkina Faso) pour modéliser l'occupation du sol à l'horizon 2020. Selon les résultats de la simulation, la mise en œuvre des mesures environnementales permet de préserver une grande partie des ressources naturelles avec d'importantes superficies pour la réserve forestière. Agbonou et al. (2018, p. 261) ont formulé un scénario basé sur la durabilité environnementale coordonnée (DEC) dans leurs travaux de modélisation des changements d'occupation des terres en région Soudanaïenne, au nord-ouest du Bénin. Les résultats de la simulation annonçaient des gains significatifs de superficies pour les forêts denses, les forêts claires, les savanes boisées et les savanes arborées et arbustives. Les résultats de la modélisation montrent que les terres agricoles diminueraient de surface, quel qu'en soit le scénario appliqué comme annoncé par Kaboré, (2013, p. 205) dans ces travaux de modélisation de l'occupation des terres sur le bassin de la Komienga.

V. CONCLUSION

Cette étude a révélé des changements majeurs obtenus dans les classes d'occupation du sol sur la période 1991-2007 à l'échelle du bassin versant du Massili à Gonsé. Ces modifications dans la couverture terrestre sont marquées par des gains de superficie dans les classes des champs au détriment des savanes, des formations ripicoles et de l'habitat. Ces changements sont aussi observés sur l'unité d'occupation du sol habitat qui a bénéficié de surface auprès des champs, des savanes, des zones nues et des formations ripicoles. Ces différentes transitions observées au cours de la période 1991-2007 a permis de faire une modélisation prospective de l'occupation du sol aux horizons 2019 et 2050 sous l'outil *LCM*, ce qui a permis de réaliser les cartes d'occupation des terres de 2050 sous les deux scénarios. La simulation a montré que sous le scénario basé sur les tendances historiques, les savanes, les zones nues, les eaux de surface, les formations ripicoles et les zones de culture vont connaître une régression de surface avec des taux respectifs de 58,57 %, 23,57 %, 21,63 %, 9 % et 5,70 %. Par contre, il est attendu une augmentation significative de l'ordre de 99 % pour l'habitat. Sous le scénario « protection environnementale », la modélisation prédit une réduction de la superficie des sols nus, des champs et des eaux de surface avec de légères hausses par rapport au scénario passé dont les taux de régression respectifs sont de l'ordre de 83,76 %, 37,03 %, 22,90 %. En revanche, la simulation annonce que les classes de savanes, de l'habitat et des formations ripicoles augmenteront avec des pourcentages respectifs de l'ordre de 166,10 %, 75,05 % et de 71,63 %. Dans l'ensemble, le bassin du Massili apparaît beaucoup plus dégradé sous le scénario LULC-A que le LULC-B qui favorise le développement des zones de savanes et de formations ripicoles. Les résultats de cette étude apparaissent donc comme un outil d'aide à la décision pour les décideurs dans les différents projets de l'aménagement du territoire.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

L'article a été rédigé par M. BAGRÉ Mathias Philippe dont la part de contribution atteint 50 %. M. KABORE Omar ; M. YAMEOGO Augustin ; M. OUEDRAOGO Wendlassida et M. SOMÉ Yelezoumin Stéphane Corenthin ont apporté leur contribution dans le traitement d'images, la modélisation de l'occupation du sol, les aspects méthodologiques et le niveau de langue. Prise globalement, leur contribution atteint un taux de 50 %.

RÉFÉRENCES

- [1]. Agbanou, T., Martin, P., Toko I.I., Tente B., (2018). Modélisation des Changements d'occupation des terres en région soudanaise au nord-ouest du Bénin. *European Scientific Journal*, Vol.14, No.12, pp. 248-266. URL:<http://dx.doi.org/10.19044/esj.2018.v14n12p248>
- [2]. Bouzou, M.I., Maiga, O.F., Ambouta, J.-M.K., Sarr, B., Descroix, L., Adamou, M.M., (2009). Les conséquences géomorphologiques de l'occupation du sol et des changements climatiques dans un bassin versant rural sahélien. *Sécheresse*, 20 (1), 145-152.
- [3]. Bagré, M.P., Sirima, B.A., Kambiré, G., Somé, Y.S.C., (2022). Impacts des pressions anthropiques sur les ressources en eau du bassin du Massili à Gonsé. *Collection recherches et regards d'Afrique*, 1, 2, 117-137.
- [4]. Bagré, M. P., Eténé, C. G., Kiema, W.-D. A., Somé, Y.S.C., (2023). « Impacts des changements d'affectation du sol et du climat sur la disponibilité des ressources en eau du bassin du Massili à l'horizon 2050 », *Revue de Géographie de l'Université de Ouagadougou*, n° spécial, vol 3, Actes du colloque d'hommage au Prof. TPZ, pp. 51-72
- [5]. Bouzou, M.I., Maiga, O.F., Ambouta, J.-M.K., Sarr, B., Descroix, L., Adamou, M.M., (2009). Les conséquences géomorphologiques de l'occupation du sol et des changements climatiques dans un bassin versant rural sahélien. *Sécheresse*, 20 (1), 145-152.
- [6]. Chalifoux, S., Nastev, M., Lamontagne, C., Latifovic, R., Fernandes, R. (2006). Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par image satellitaire Landsat en hydrogéologie. *Télédétection*, 6(1), 9-17. <https://www.semanticscholar.org>.
- [7]. Dodane, C., Joliveau, T and Rivière-Honegger, A. (2014). Simulating land use to anticipate the future of the territory. Critical analysis of a geopropective experience in a peri-urban catchment (Yzeron, Lyon metropolitan area). *European Journal of Geography*. 1-60. <https://doi.org/10.4000/cybergeogeo.26483>

- [8]. Fournet, F., Meunier-Nikiema A., Salem G. (2008). Ouagadougou (1850-2004). Une urbanisation différenciée. Petit atlas urbain, collection «Petit atlas urbain», Ouagadougou, Burkina Faso, Ouagadougou, 143p. https://horizon.documentation.ird.fr/exldoc/pleins_textes/divers10-05/010048783.pdf
- [9]. Gbohoui, Y. P., Paturel, J-E., Fowe, T., Karambiri, H., Yacouba, H. (2021). Impacts des changements climatique et environnemental sur la réponse hydrologique du bassin du Nakanbé à Wayen (Burkina Faso) à travers le cadre de budyko. *Hydrology of Large River Basins of Africa*, 384, 269-273. <https://doi.org/10.5194/piahs-384-269-2021>.
- [10]. Herrera, R et Ilboudo, L., (2012). Les défis de l'agriculture paysanne : le cas du Burkina Faso. *Homme & la Société*, 1-2 (183-184), 83-95.
- [11]. INSD, (2017). Projections démographiques des communes du Burkina Faso de 2007 à 2020. Rapport final, Burkina Faso, Ouagadougou, 1860 p.
- [12]. Kaboré, O. (2013). Dynamique de l'utilisation des terres dans les écosystèmes de savane et systèmes agraires du Bassin versant de la Komienga (Burkina Faso). [Thèse de doctorat unique, Université Professeur Joseph KI ZERBO], Burkina Faso, 281p.
- [13]. Kaboré/Bontogho, P.E., (2015). La modélisation d'une allocation sahélienne des ressources en eau en fonction du climat le changement et la pression humaine : cas du barrage de Loumbila au Burkina Faso. Thèse de doctorat, université 2iE, Ouagadougou Burkina Faso. <http://documentation.2ie-edu.org>
- [14]. Kambou, F. N., Zougmore, R. (1996). Évolution des états de surface d'un "zipellé" soumis à différentes techniques de restauration des sols (Yilou, Burkina Faso). *Bulletin du réseau érosion*, 16, 19-32.
- [15]. Kiansi, T.M., Kouta, S., Mazo, I., Arouna, O., Thomas, O., et Toko Imorou, I. (2021). Spatio-temporal dynamics of agricultural spaces within the community of municipalities of Pendjari in Northwest of Benin. *International Journals of Sciences and High Technologies*, 25(2), 98-108
- [16]. Kpedenou, K.D., Drabo, D., Ouoba, A.P., Da, D.E.C., Tchamie, T.T.K. (2017). Analyse de l'occupation du sol pour le suivi de l'évolution du paysage du territoire Ouatchi au sud-est Togo entre 1958 et 2015. *Cahiers du cerleshs*. XXXI (55), 203-228. [ffhal-01701176f](https://doi.org/10.17011/201701176f)
- [17]. Mahé, G., Diello, P., Paturel, J.E., Barbier, B., Karambiri, H., Dezetter, A., Dieulin, C., Rouché, N., (2010). Baisse des pluies et augmentation des écoulements au Sahel : impact climatique et anthropique sur les écoulements du Nakanbé au Burkina Faso. *Sécheresse*, 21, 1, pp. 330-332. <http://www.secheresse.info>
- [18]. Mishra, N.V., Rai, P.K., Mohan, K. (2014). Prediction of land use changes based on land change modeler (lcm) using remote sensing: a case study of muzaffarpur (bihar), india. *J. Geogr. Inst. Cvijic*. 64(1), 111-127. DOI: 10.2298/IJGI1401111M
- [19]. Ministère du Commerce, de l'Industrie et de l'Artisanat/Direction Générale des Études et des Statistiques Sectorielles, (2019). Tableau de Bord Statistique du Commerce, de l'Industrie et de l'Artisanat 2018. Rapport final, Ouagadougou, Burkina Faso, 81 p.
- [20]. Ministère des Ressources Animales et Halieutiques/Direction Générale des Espaces et des Aménagements Pastoraux, (2019). Résultats du suivi et de l'évaluation des productions des pâturages pour la campagne pastorale 2017-2018 au Burkina Faso. Rapport final du programme de croissance économique dans le secteur agricole (PCESA), Ouagadougou, Burkina Faso, 34 p.
- [21]. Oloukoi, J. (2013). Scénario socio-économique et écologique des changements de l'occupation des terres au Bénin. *VertigO*, 13(1), 2-22. <https://id.erudit.org/iderudit/1026583ar>
- [22]. Pieyns S., et Klein, J. -C. (1964). *Étude hydrologique de bassins versants dans la région de Ouagadougou : campagne 1962 : tome 1. Données géographiques et climatologiques, étude hydrologique. Tome 2. Étude hydrologique (suite)*. République de Haute-Volta, 163 p. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers14-11/04528.pdf

- [23]. Savadogo, S., Ouédraogo, A., Thiombiano, A. (2011). Diversité et enjeux de conservation des bois sacrés en société Mossi (Burkina Faso) face aux mutations socioculturelles actuelles. *International Journal Biologie Chemical Science*, 4(5), 1639-58. Doi : 10.4314/ijbcs.v5i4.27
- [24]. Sylla, D. et Hauthouot, C. (2016). Dynamique de l'occupation du sol dans la zone dense de Korhogo à partir d'une approche "PIXEL PAR PIXEL" appliquée à des images LandsatTM/ETM. *Revue de géographie tropicale et environnement*, (2), 31-39
- [25]. Somé, Y. S. C. (2014). Influential factors on the Sahelian agricultural production yield under a changing climate. *Environmental Science An Indian Journal*, 9(5), 177-185. <https://www.tsjournals.com/articles/influential-factors-on-the-sahelian-agricultural-production-yield-under-a-changing-climate.pdf>
- [26]. Toutain, B. (1977). Essais de régénération mécanique de quelques parcours sahéliens dégradés. *Rev. Elcv. Méd. vét. Pays trop*, (2), pp. 191-198.
- [27]. Yaméogo, A. (2021). *Caractérisation de la dynamique érosive dans le bassin versant supérieur de la Sissili (Burkina Faso)*. [Thèse de doctorat en environnement et aménagement du territoire, université Norbert Zongo], 254p.