

MODÉLISATION DES MUTATIONS SPATIALES D'ORIGINES ANTHROPIQUES ET LEURS IMPACTS AUTOUR DES AIRES PROTÉGÉES DE LA PÉRIPHÉRIE NORD DE LIBREVILLE (GABON)

par Cédric Mpié Simba

UMR 7324 CITERES, Cité, Territoire, Environnement et Société. Université François Rabelais de Tours, France
cedricmpie@gmail.com

Marjolaine Okanga-Guay

Laboratoire de Géomatique, de Recherche Appliquée et de Conseil, Département de Géographie, Université Omar Bongo, Libreville, Gabon
m_okanga_guay@yahoo.fr

et Jean Louis Yengué

EA RURALITES, Université de Poitiers, France
jean.louis.yengue@univ-poitiers.fr

Dans les territoires soumis à de fortes pressions anthropiques, comme les zones périphériques des grandes villes, la modélisation et la simulation des changements sont des outils importants pour comprendre et appréhender les effets des actions d'aujourd'hui sur les territoires de demain. Cet article a pour objectif la modélisation des dynamiques de l'occupation du sol et leurs effets autour des aires protégées de la zone nord de Libreville (Gabon). À partir des changements observés entre 2000 et 2014, l'article propose une analyse projective (en 2020 et 2028) sur la base des tendances passées. Grâce à un modèle de changement centré sur les dynamiques des surfaces artificielles, des projections sont réalisées à l'aide de la plateforme Land Change Modeler (LCM). Au regard des données disponibles, une approche probabiliste basée sur un scénario tendanciel est choisie pour la simulation des changements. Sur la base des probabilités de transition future, la procédure a déterminé les surfaces qui devraient changer aux dates de prédiction (2020 et 2028). Les simulations de changements montrent que les classes les plus affectées par une dynamique régressive sont la forêt peu dense, la forêt dense et la mangrove, au profit des surfaces artificielles. Les formations végétales ont les probabilités de conversion les plus élevées soit 57,58 % pour la forêt peu dense, 21,17 % pour la forêt dense et 17,68 % pour la mangrove. Les matrices de probabilité de transition révèlent que la probabilité du cadre bâti à occuper les forêts peu denses varie entre 33 et 41 %, alors que sa probabilité à coloniser la forêt dense varie entre 0,72 et 7 %. Ces résultats montrent que l'avenir de l'Arborétum Raponda Walker (forêt classée) est en danger du fait d'un mitage important de ses surfaces de forêt.

Mots clés : Anthropisation, modélisation, nord de Libreville, occupation du sol; simulation des changements.

For territories subject to strong anthropogenic pressures, such as urban peripheries of major cities, modelling and simulating changes is an important issue to understand the effects of today's actions on the territories of tomorrow. This article aims at modelling the dynamics of land cover and their effects around the protected areas of the northern zone of Libreville, using an approach combining quantification and spatialization of remote sensing data. The paper also proposes a projective analysis of these dynamics for 2020 and 2028. The results show that, between 2000 and 2014, the land cover classes most affected by regressive dynamics were the low-density forest, dense forest and mangrove. These classes were mostly converted to artificial areas. Vegetation formations (forests and mangroves) had the strongest conversion factors between 2000 and 2014, with 57.58% for low-density forest, 21.17% for dense forest and 17.68% for mangrove. The transition probability matrix indicate that the probability of the built environment occupying low-density forests ranges from 33% to 41% for 2020 to 2028, while its probability of colonizing dense forest ranges from 0.72% to 7.76% for the same years. The simulations carried out show that the future of the protected zone will undergo a significant reduction of its forest surfaces, despite some areas of forest regeneration.

Keywords: Anthropization; land cover; modeling; north of Libreville; simulation of changes.

Introduction

Les zones périurbaines sont soumises à des dynamiques fortes et rapides qui souvent entraînent des déséquilibres spatio-environnementaux importants. Ces transformations périurbaines peuvent avoir des moteurs variés selon les régions : l'exploitation des produits forestiers par les citoyens (Afrique centrale, Trefon, 1997), les spéculations immobilières (Afrique centrale soudanienne, Ngana *et al.*, 2009), l'approvisionnement en bois-énergie (Sahel, FAO, 2010 ; Peltier, 2019) ou les pratiques agricoles (Amazonie, Eloy et Le Tourneau, 2009, Afrique de l'Ouest, Tente *et al.*, 2011). La quête d'une qualité paysagère ou la préservation de la biodiversité peut nécessiter de comprendre les mutations spatiales observées et prévenir les répercussions liées à son évolution spatiotemporelle. En effet, selon Voiron-Canicio (2012), anticiper le changement est une démarche qui consiste à rechercher les évolutions probables ou possibles d'une situation ou de l'état d'un phénomène, à évaluer leur probabilité d'occurrence, leur nature, leur ampleur et leurs impacts.

Au nord de Libreville, dans la commune d'Akanda (Gabon), l'urbanisation rapide conduit à une artificialisation importante des milieux « naturels ». Les forêts se dégradent et se fragmentent ; la surface intacte des aires protégées tout autour se réduit et leur intégrité même pourrait être menacée (Okanga-Guay, 2013). Vu sous cet angle, disposer d'éléments permettant d'anticiper les changements et d'évaluer les conséquences des actions d'aujourd'hui sur l'avenir de ce territoire fragile, est une question cruciale pour une politique d'aménagement cohérente et efficiente. Pour ce faire, la modélisation et la simulation spatiale sont appelées à être utilisées pour comprendre, expliquer et projeter les changements possibles et leurs effets sur l'évolution du territoire sous forme de scénarios. La modélisation et simulation recouvrent deux sens différents mais complémentaires. La modélisation est une technique qui permet de comprendre et d'expliquer le fonctionnement d'un système par l'analyse des interactions entre ses entités spatiales (souvent dynamiques). Elle procède par démantèlement du système étudié, dans le but de mettre en évidence ses règles de fonctionnement. La simulation, quant à elle, consiste à utiliser ces connaissances (issue de la modélisation) pour en produire de nouvelles. Elle a pour objet la recherche des évolutions possibles d'un phénomène par le biais d'un programme informatique. Selon Thériault *et al.* (2011), la modélisation a pour but d'étudier les interactions entre les entités spatiales et de « modéliser » les mécanismes de changements tandis que la simulation permet de reproduire l'évolution

du territoire, de valider la pertinence des modèles et de projeter l'évolution possible, selon des approches probabilistes ou déterministes.

Cet article a pour objet la modélisation du territoire afin de représenter et d'analyser deux facteurs de transformation majeurs : l'étalement urbain et la dynamique du couvert végétal. Cette étude produira des informations qualitatives, quantitatives et cartographiques d'aide à la décision, principalement pour la préservation des aires protégées. Elle a donc pour objectifs de réaliser une cartographie de l'occupation du sol, d'identifier les changements opérés entre 2000 et 2014 et de simuler les transformations possibles d'une partie de la commune d'Akanda, en périphérie Nord de Libreville aux horizons 2020 et 2028. La question centrale est de savoir quelle sera, dans le futur, la configuration spatiale de la zone en termes d'occupation du sol, principalement l'évolution des surfaces artificielles (bâti et sol nu) par rapport aux écosystèmes naturels, tels que la forêt de terre ferme, la mangrove et l'aire protégée (Arborétum Raponda Walker). Ces images différenciées des futurs possibles permettront d'identifier les espaces à enjeux soumis aux risques de déforestation ou de dégradation forestière et, éventuellement, d'éviter le risque d'un aménagement destructeur de la biodiversité.

Méthodologie

Zone d'étude

Située dans la partie nord de Libreville (Gabon), la zone d'étude couvre une superficie de 289 km² et intègre le 1^{er} et le 2^e arrondissement de la commune d'Akanda (fig. 1). L'essentiel de la tache urbaine se concentre dans la moitié sud et s'effrite au fur et à mesure que l'on avance vers le nord et qu'on s'éloigne des voies routières principales. Aujourd'hui, la zone connaît une forte dynamique et même les zones non construites semblent être occupées. Le nord de la zone abrite un riche écosystème, composé de forêts de terre ferme et de mangroves entrecoupées de nombreux cours d'eau, intégré dans deux aires protégées par les pouvoirs publics : l'Arborétum Raponda Walker (depuis 1951) et une partie du Parc National Akanda (depuis 2012). Les altitudes du site, localisé sur la plaine littorale, varient entre 0 et 89 m. L'essentiel de l'aire urbaine est construit sur des espaces qui ne dépassent pas 35 m. La température moyenne annuelle enregistrée est de 25,9°C avec un taux d'humidité relative de plus de 80% (Maloba Makanga, 2011). Les valeurs de pluviométrie sont celles enregistrées pour Libreville et varient entre 2800 et 3200 mm par an.

Vu du ciel, ce territoire offre une diversité de structures paysagères, mais, reste principalement dominé par la trame verte. Depuis une dizaine d'années, elle subit des pressions humaines importantes, la population de la zone étant passée de près de 4 600 habitants en 1993 à plus de 34 500 en 2013 (RGPL 1993 et RGPH 2013). Cette croissance se matérialise spatialement par l'étalement de la surface bâtie.

Aujourd'hui, la zone nord de Libreville joue plusieurs fonctions parmi lesquelles, *la fonction résidentielle* perceptible à travers des projets de construction de logements des pouvoirs publics, qui souhaitent faire de cette zone un modèle de développement urbain, une ville avec des quartiers aménagés, regroupant des services urbains. Ces constructions ont métamorphosé le paysage du quartier Agondjé, autrefois délaissé. Mais, elles ont aussi attiré les populations et les constructions non planifiées. Ces occupations sont favorisées par le processus d'accès à la propriété foncière qui échappe en partie au contrôle des pouvoirs publics. Ce sont les propriétaires autochtones, chefs de quartiers et de villages, anciens et notables détenteurs de parcelles (terrain ancestral) qui les cèdent aux plus offrants. Ce mécanisme amplifie le processus d'occupation anarchique des espaces et exacerbe les dégradations. *La fonction de loisirs* est caractérisée par des activités proposées dans les sites balnéaires du Cap Estérias et du Cap Santa Clara. Des activités de loisirs et de plein air sont offertes dans les aires protégées (l'Arborétum Raponda Walker, et le parc National d'Akanda) des écosystèmes naturels et patrimoines culturels. Pour l'ARW en particulier, des circuits découvertes et touristiques sont accessibles aux visiteurs. *La fonction d'approvisionnement* est assurée par les écosystèmes forestiers et aquatiques de cette zone qui regorgent des ressources et services écosystémiques utiles pour les populations locales. La zone ravitaille les populations urbaines et périurbaines en produits vivriers locaux tels que le vin de palme, le poisson, la viande, et certains produits agricoles et forestiers. Ces activités se développent principalement autour de Bolokoboué,

Ivinda, Malibé 1 et 2, Cap Esterias, Cap Caravane et île Moka, 1^{er} Campement, etc.

Matériels

Les données utilisées sont essentiellement constituées d'images Landsat 7 et 8 des années 2000 et 2014 (tableau 1). Une image de 2018 a également été utilisée pour valider le modèle. Le choix de ces dates est principalement conditionné par la qualité des données disponibles et exploitables. Le taux de couverture nuageuse varie entre 30 et 31 % sur l'ensemble des dalles, mais demeure absent de la zone d'intérêt aux trois dates (après extraction). Le reste des images est lourdement chargé en nuages et ne permet pas une bonne comparabilité des données. Les données extraites servent à la production des cartes d'occupation du sol, supports sur lesquels repose cette étude. Elles ont été traitées et ont subi une classification supervisée dans le logiciel Arc-Gis 10.4. Les résultats sont exportés vers *Idrisi TerrSet* pour la modélisation des changements et l'extraction du modèle ou du sous-modèle de changement de l'occupation du sol. Celui-ci est utilisé pour simuler l'occupation du sol à l'aide du module *Land Change Modeler* (LMC) d'*Idrisi TerrSet*.

Méthode

La démarche méthodologique adoptée se décompose en trois parties (fig. 2). La première consiste en la production des données sur les dynamiques d'occupation du sol à l'aide des images satellitaires Landsat de la période de 2000-2014 (Mpié Simba, 2016). L'algorithme *Maximum Likelihood* est choisi pour la classification supervisée. Les bandes proche infrarouge, rouge, verte et bleue, et des indices ont été utilisés pour identifier cinq catégories d'occupation du sol : forêt dense, forêt peu dense, mangrove, cours d'eau et surfaces artificielles (bâti, sols nus). Ces deux catégories sont rassemblées en une seule, à cause d'un fort taux de confusion des pixels et, surtout, parce qu'elles contribuent à la déforestation et à l'artificialisation. Plusieurs indices permettant la différenciation biophysique du couvert végétal ont été calculés :

	Capteur	Année	Mois	Jour	Résolution spatiale	Couverture nuageuse des dalles
Landsat 7	ETM+	2000	Avril	07	30 m	30,23 %
Landsat 8	OLI	2014	Avril	06	30 m	31,78 %
Landsat 8	OLI	2018	Juillet	22	30 m	31%

Source des données : U.S. Geological Survey

Tableau 1: Tableau récapitulatif des images satellitaires utilisées

- Normalized Difference Vegetation Index (équation 1)

$$NDVI = (B4 - B3) / (B4 + B3)$$

- Brightness Index (équation 2)

$$BI = 0,3037 B1 + 0,2793 B2 + 0,4743 B3 + 0,5585 B4 + 0,5082 B5 + 0,1863 B7$$

- Wetness Index (équation 3)

$$WI = 0,1509 B1 + 0,1973 B2 + 0,3279 B3 + 0,3406 B4 - 0,7112 B5 - 0,4572 B7$$

Ces trois néo-canaux ont permis de distinguer les types forestiers en fonction de trois critères à savoir l'activité chlorophyllienne, le recouvrement au sol et le taux d'humidité. Ainsi, il a été possible de différencier les forêts denses (strate dense à canopée fermée) des forêts peu denses (forêt claire ou à canopée ouverte, composée de strate arbustive et herbeuse) et les mangroves (forêts inondées).

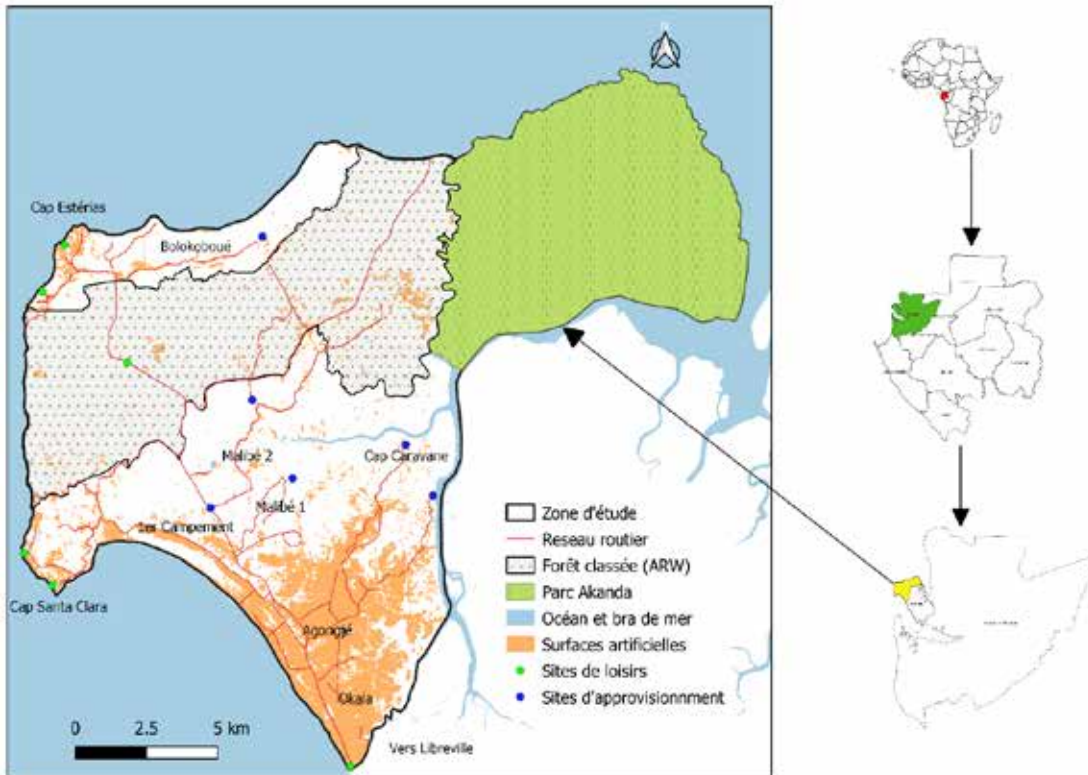
Après la sélection des zones d'intérêt, les différentes classes d'occupation du sol ont été analysées en termes de séparabilité des valeurs spectrales. Cette étape consiste à l'extraction automatique des valeurs de pixels des régions d'intérêt (ROI) et le calcul de leur moyenne et écart-type afin de produire les signatures spectrales de chaque classe. La fiabilité de cette classification a été vérifiée à partir des matrices de confusion et l'indice Kappa (Congalton, 1991). Selon Descplnoy, cité par El Hadraoui (2013 : 46), une classification est fiable et exploitable si, et seulement si, les pourcentages sont supérieurs à 80 %. Les résultats de l'évaluation de la fiabilité des classifications sont dans l'ensemble très satisfaisants avec une précision globale de 98,56% en 2000 et 94,26% en 2014 avec des indices Kappa à accord presque parfait, soit respectivement 0,97 et 0,92.

La deuxième partie de la méthodologie, consiste à prévoir le devenir possible du territoire à partir des scénarios en faisant appel aux techniques de la modélisation et de la simulation (Jenerette et Poterie, 2010). Pour cette étape, nous avons choisi de travailler avec la plateforme de prédiction *Land Change Modeler*. La flexibilité de ce modèle et surtout sa capacité à effectuer les différentes tâches a été objectivée par Mas *et al.*, (2011) dans une étude comparative des outils de modélisation. Le but est d'aider les futurs utilisateurs à faire le choix de l'outil le plus adapté en fonction de leur problématique. LCM répond à la démarche de modélisation choisie dans cette étude à savoir la production des cartes et données sur les probabilités de changements et la projection des surfaces de changements futurs. Pour prédire les changements, LCM (comme la majorité des modules de simulation des changements d'occupation du sol) est limité à l'entrée

de deux dates à condition qu'elles soient suffisamment éloignées l'une de l'autre. Ici, la modélisation est initiée en exportant les résultats de la classification 2000 et 2014 sur *Land Change Modeler* pour l'analyse des dynamiques et la construction du modèle de changement. Les différentes phases de modélisation à l'aide du module LCM du logiciel Idrisi TerrSet sont ensuite mises en place :

a. Construction de la base de connaissances de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol. Le comportement spatiotemporel de chaque catégorie d'occupation du sol est analysé diachroniquement par les interactions entre catégories (Schlaepfer *et al.*, 2002) à l'aide d'une matrice de transition. Ces opérations se réalisent avec la tâche « *change analysis* », destinée à l'analyse des changements d'occupation des sols passés ou présents. Le paramétrage est initié en définissant les « *inputs* », c'est-à-dire les données en entrées du modèle. Ce sont généralement des cartes d'occupation et d'usages des terres à des dates différentes et générées par classification d'images. Cette étape produit les *cartes de changements* d'occupation et d'usage du sol, d'une part, et les *tendances de changements*, d'autre part. Les premières correspondent à l'ensemble des dynamiques spatio-temporelles de chaque unité du paysage qui se sont produites entre plusieurs dates. Elle permet d'observer les différentes transitions entre une ou plusieurs classes, de voir les surfaces qui ont changé et celles qui, au contraire, sont restées stables. Les progressions, les régressions et la stabilité des surfaces peuvent être analysées et le résultat se présente cartographiquement ou graphiquement.

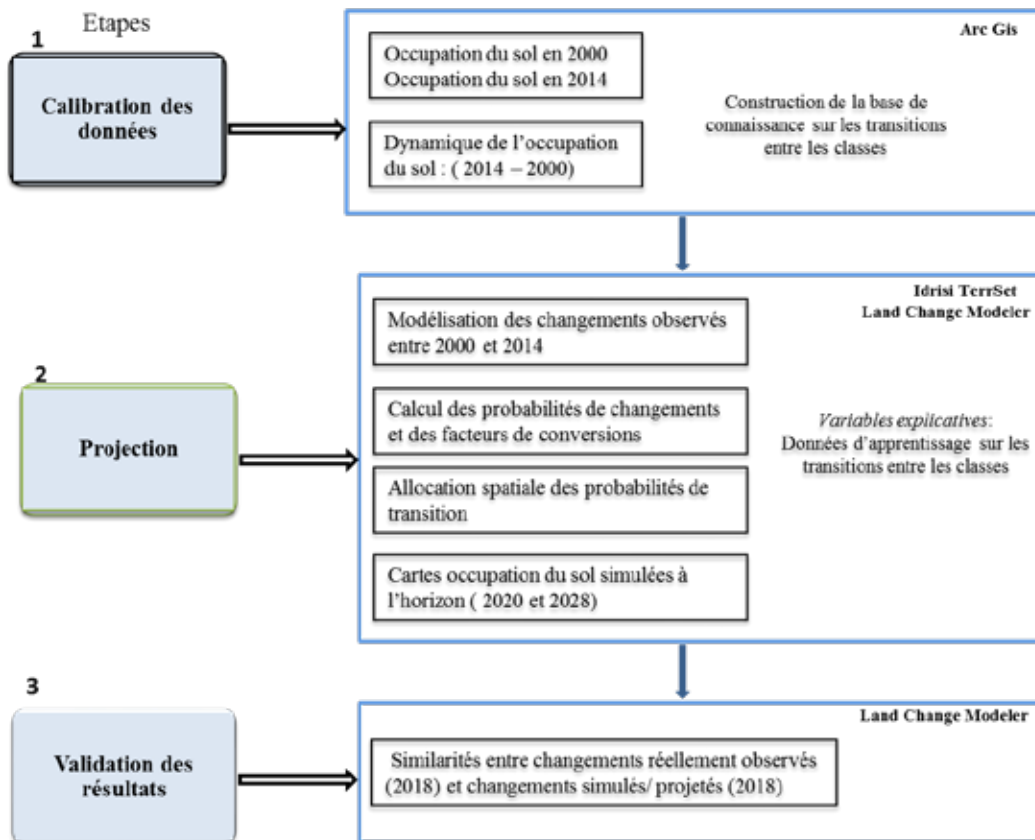
b. Calcul des probabilités de transition et du facteur de conversion (Equation 1) (Oloukoi *et al.*, 2007), entre les dates de la phase d'apprentissage et la date simulée. Ces opérations se réalisent dans la tâche, « *transitions potentials* », consacrée à la modélisation du potentiel de transition d'une classe d'occupation du sol vers une autre. Ici, il s'agit d'évaluer la susceptibilité au changement. Au préalable, il faut élaborer un sous-modèle de changement qui définit les principales transitions qui se sont opérées entre les unités d'occupation du sol. L'ensemble des données issues de l'analyse des dynamiques passées permet de dégager les tendances de changement pour chaque catégorie. Ces données indiquent pour l'ensemble du territoire, les entités spatiales pour lesquelles les changements ont été les plus importants.



Réalisation : Mpié Simba, 2021 ; Source : Images Landsat 2000 et 2014.

ARW= Arborétum Raponda Walker (la forêt classée qui porte le nom du premier botaniste gabonais)

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude



Réalisation : Mpié Simba, 2020.

Figure 2 : Synthèse de la méthodologie générale

Ces tendances sont généralement représentées par des valeurs décimales qui varient de 0 à 1. Plus la valeur est proche de 1, plus la tendance au changement d'une classe d'occupation du sol est élevée. Quand elle tend vers zéro, la tendance ou l'intensité de la classe au changement est faible. Le potentiel de transition détermine la probabilité d'une classe à se transformer en une, ou plusieurs classes. Ici, le modèle s'appuie sur les connaissances passées des dynamiques d'occupation du sol pour prédire le futur, suivant une approche probabiliste. Le calcul des probabilités nécessite de définir l'année de projection. Dans la phase d'apprentissage (LUC Budget), LCM va calculer le taux d'expansion moyen annuel des catégories d'occupation du sol. En fonction du pas de temps défini, LCM va estimer la probabilité de transition de chaque catégorie dans le futur.

Équation 4 : Facteur de conversion = $(Sc / Si1) * 100$ (Oloukoi *et al.*, 2007)

où, Sc : Superficie totale des changements d'une catégorie vers d'autres

$Si1$: Superficie de la même catégorie en année de départ.

c. Allocation spatiale des probabilités de transition markoviennes pour la réalisation des cartes simulées d'occupation du sol. Ces opérations se déroulent dans la tâche «*change prédiction*», dédiée à la prédiction des changements probables d'occupation du sol. Elle est composée d'un sous-modèle de demande de changement qui estime la quantité des changements futurs et d'un sous-modèle d'allocation spatiale du changement qui détermine les surfaces d'occupation du sol qui vont potentiellement changer. Le résultat se présente sous forme de carte prédictive d'occupation du sol à un temps $T + n$. LCM met en œuvre des méthodes et techniques pour l'analyse et la prévision des changements spatiaux. Dans le détail, il utilise une procédure d'affectation multi-objectifs basée sur les probabilités des différents types d'occupation du sol et la quantité de changements calculée (Aguejdad, 2014). LCM utilise plusieurs sous-modèles comme les chaînes de Markov, le modèle de régression logistique, les automates cellulaires, le réseau neuronal et la perception multicouche pour reproduire les dynamiques spatiales et temporelles de l'occupation des sols. Sur la base des cartes de probabilité de changements réalisées, l'algorithme

sélectionne les pixels qui connaîtront un changement. Sont prioritairement sélectionnés les pixels qui présentent une forte probabilité au changement. Cette tâche comporte, à la fin, un module qui permet de procéder à l'évaluation ou la validation des cartes produites.

La troisième partie est liée à la validation du modèle de simulation. Elle procède par la comparaison des similarités entre les changements réellement observés et les changements projetés. La validation sera réalisée par comparaison des coïncidences entre une carte d'occupation du sol réelle de 2018 et une carte projetée ou simulée de la même année. Comme les modèles de prédiction des changements d'occupation du sol sont l'objet de beaucoup d'incertitudes (Aguejdad *et al.*, 2016, Ferchichi, 2017, Paegelow *et al.*, 2018), le but de cette étape est d'évaluer la capacité du modèle à reproduire vraisemblablement les dynamiques spatiales. Une similarité forte entre la carte réelle et la carte simulée exprime la capacité du modèle à prédire les changements et augmente la confiance vis-à-vis des résultats obtenus pour une année plus lointaine. LCM prend en compte les erreurs qui peuvent survenir des classifications d'images satellitaires et donc tient compte de la fiabilité des cartes d'occupation du sol en corrigeant des valeurs des probabilités de la matrice. En effet, les méthodes de classification ne permettant pas de réaliser des cartes parfaites, cette option permet donc de relativiser la confiance apportée aux quantités estimées de changements attendus.

Résultats

Dynamique de l'occupation du sol entre 2000 et 2014

La période 2000-2014 est marquée par des mutations importantes (fig. 3). La tendance générale indique des modifications significatives des surfaces artificielles (bâti, sols nus), des forêts et de la mangrove. L'analyse diachronique de l'occupation du sol montre que la couverture végétale connaît une régression importante de sa surface passant de 252 km² en 2000 à 212 km² en 2014 (tableau 2). La forêt peu dense perd une superficie considérable (- 34,52 km²) au profit des surfaces artificielles, qui enregistrent une variation de + 40,71 km² entre les deux dates. En outre, les mangroves et les cours d'eau connaissent aussi une dynamique régressive soit respectivement -7,19 km² et -0,62 km² alors que la forêt dense progresse légèrement (+ 1,62 km²). Précisons que les changements de catégories se font majoritairement en faveur des surfaces artificielles.

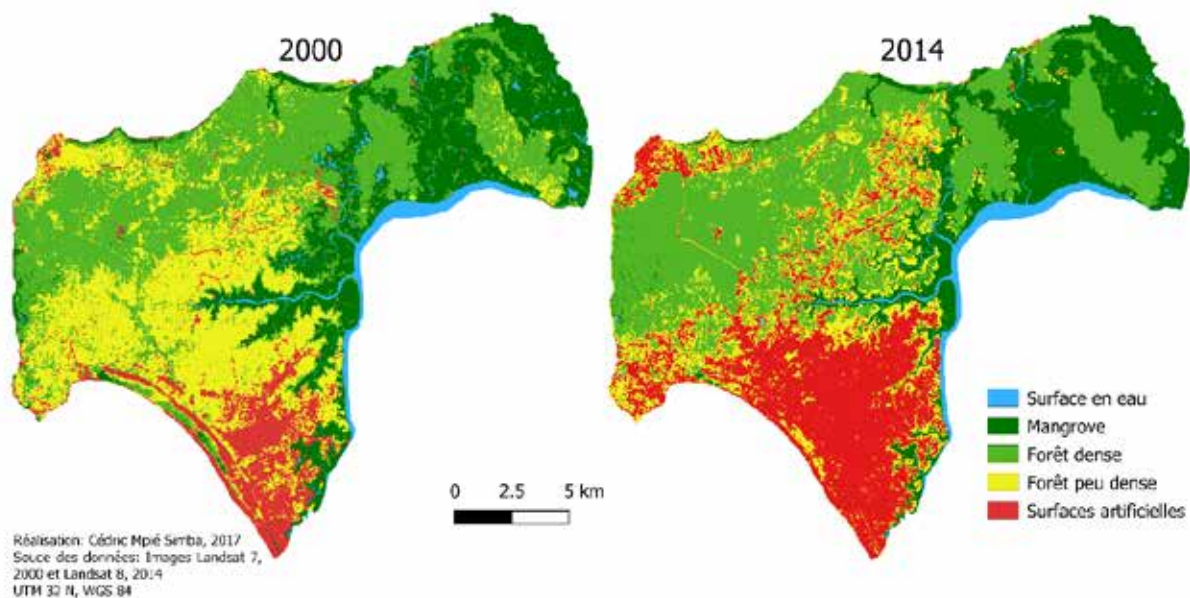


Figure 3 : Étude diachronique de l'occupation du sol au nord de Libreville (Gabon) en 2000 et 2014

CLASSES	2000		2014		Évolution 2000-2014
	Surface		Surface		Surface
	km ²	%	km ²	%	km ²
Surface artificielle	27,59	9,55	68,30	23,63	40,71
Forêt dense	104,27	36,07	105,89	36,64	1,62
Forêt peu dense	84,35	29,18	49,82	17,24	-34,52
Mangrove	63,84	22,09	56,66	19,60	-7,19
Cours d'eau	8,97	3,10	8,35	2,89	-0,62
TOTAL	289,02	100	289,02	100	

Source : D'après l'analyse des données Landsat 2000-2014.

Tableau 2 : Dynamique de l'occupation du sol au nord de Libreville entre 2000 et 2014

Au nord de Libreville, cette tendance à l'artificialisation traduit l'étalement du bâti et l'augmentation des activités socioéconomiques, dont la conséquence directe est la déforestation et la dégradation. Cette progression du cadre bâti en périphérie est une conséquence directe de la saturation et du manque d'espaces disponibles pour la construction de logements à Libreville. La légère progression de la forêt dense est liée à sa conservation dans la zone de l'Arborétum, bien que certaines dégradations y soient enregistrées. La tache anthropique est beaucoup moins perceptible dans le Parc National d'Akanda (secteur nord-est) en 2014. Le facteur principal de cette dégradation des forêts, en zone protégée ou non, est l'étalement du bâti (fig. 4).

En outre, la régression de la mangrove est, quant à elle, essentiellement due à l'étalement résidentiel issu des initiatives des populations en manque d'espaces pour la construction de logements individuels (fig. 5), mais aussi aux dégradations liées à certaines activités comme la pêche. Le manque d'espace pour la construction est tel que les populations n'hésitent pas à occuper les zones *non aedificandi*.

Dynamiques des changements des écosystèmes forestiers

Cette partie s'intéresse aux dynamiques des écosystèmes naturels. En effet, l'analyse par SIG des catégories d'occupation du sol indique des changements à l'intérieur et à l'extérieur des limites de l'Arborétum (ARW) et de la fraction du Parc National d'Akanda (PNA) faisant partie de la zone d'étude. Globalement, l'intensité des changements est plus forte en-dehors des limites de la forêt protégée. Les forêts peu denses

par exemple, subissent plus de pertes, soit 62,48 km², que de gains de superficie, soit 27,15 km². Dans cette catégorie, la perte de surface se localise majoritairement à l'extérieur de la zone protégée, soit 56,95 km² ; alors qu'à l'intérieur du parc, les pertes de forêt peu dense sont de 5,53 km² (fig. 6). Cette tendance se confirme également pour les gains, qui sont de 1,83 km² à l'intérieur de la zone protégée contre 25,31 à l'extérieur. *FD* : forêt dense ; *FPD* : forêt peu dense

Dans l'Arborétum, la dynamique est marquée par les gains et les pertes de surface entre la forêt dense, la forêt peu dense et la surface artificielle. L'analyse de la figure 6 montre que le gain d'une forêt peu dense se fait au détriment d'une forêt dense et correspond à une dégradation de ces dernières. Cette évolution est liée à une anthropisation du territoire (pression foncière, habitat diffus, activités agricoles etc.). Elle revêt un caractère négatif et correspond au phénomène de dégradation forestière (tableau 3). En outre, le gain d'une forêt dense correspond à une évolution des forêts peu denses (en forêt dense). Cette mutation revêt un caractère positif et traduit une régénération de la forêt dense dans l'aire protégée notamment dans ses secteurs sud-ouest et centre-sud. On peut donc conclure que la politique de conservation de cette forêt, mise en œuvre en 2004, a favorisé la régénération d'une partie des forêts denses dans le parc. Malgré cette régénération des forêts, leur dynamique de régression reste supérieure. Les transformations telles que les gains de mangrove ou des espaces de forêts traduisent la capacité de ces écosystèmes à se régénérer. Cependant, le changement global de la mangrove est négatif puisqu'elle a connu un gain de 6,54 km² et une perte de 14,03 km².

Transitions	Signification de la transition	Qualité du changement		Surfaces en km ²
		Changements positifs	Changements négatifs	
Fd à Fpd	Dégradation forestières	-	Négatif	27,15
Fd à Sa	Déforestation / artificialisation		Négatif	28,23
Fpd à Fd	Régénération forestière	Positif	-	30,52
Fpd à Sa	Artificialisation / déforestation	-	Négatif	62,48
Sa à Fd	Régénération forestière	Positif	-	30,52
Sa à Fpd	Régénération forestière	Positif	-	2,99
Mg à Sa	Artificialisation	-	Négatif	14,03
Ce à Mg	Régénération	Positif		6,54
Sous total (en km²)		40.06	176,05	
<i>Surfaces stables : 72,90</i>				
<i>Total : 289,02</i>				

Sa : Surface artificielle ; *Ce* : Cours d'eau ; *Mg* : Mangrove ; *Fd* ; Forêt dense ; *Fpd* : Forêt peu dense

Tableau 3 : Traduction des mutations spatiales observées entre les catégories d'occupation du sol

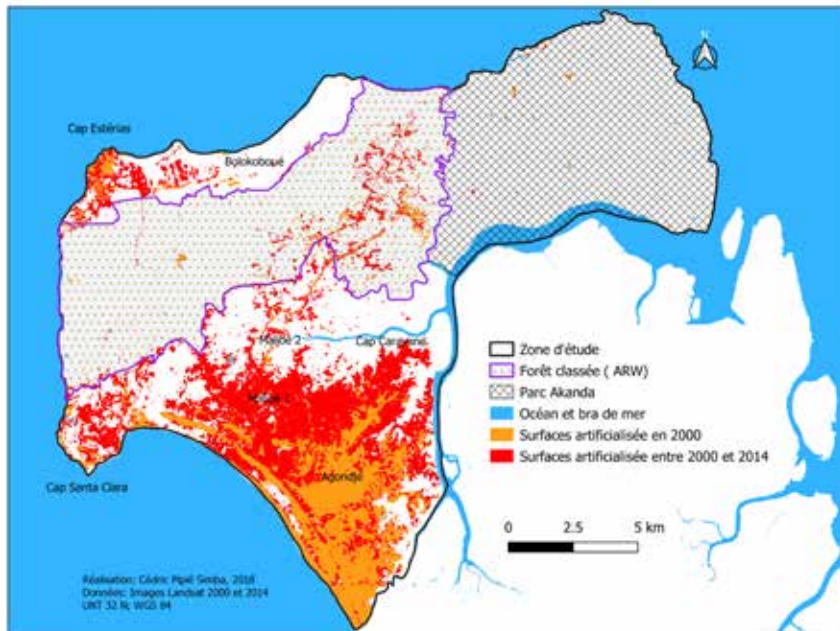


Figure 4 : Dynamique des surfaces artificielles entre 2000 et 2014



Photographie Cédric M. Simba, 2017 et tout mettre en italique 2017 : Destruction des surfaces de mangrove par les populations locales. La planche photographique présente une surface destinée à accueillir un logement privé. La mangrove est abattue, séchée puis brûlée avant la construction du logement. Cette technique, répandue chez les populations locales en manque d'espace est un mode courant d'appropriation des surfaces et des terrains à bâtir de manière illégale et spontanée.

Figure 5 : Dégradation des écosystèmes de mangrove par l'action de l'homme

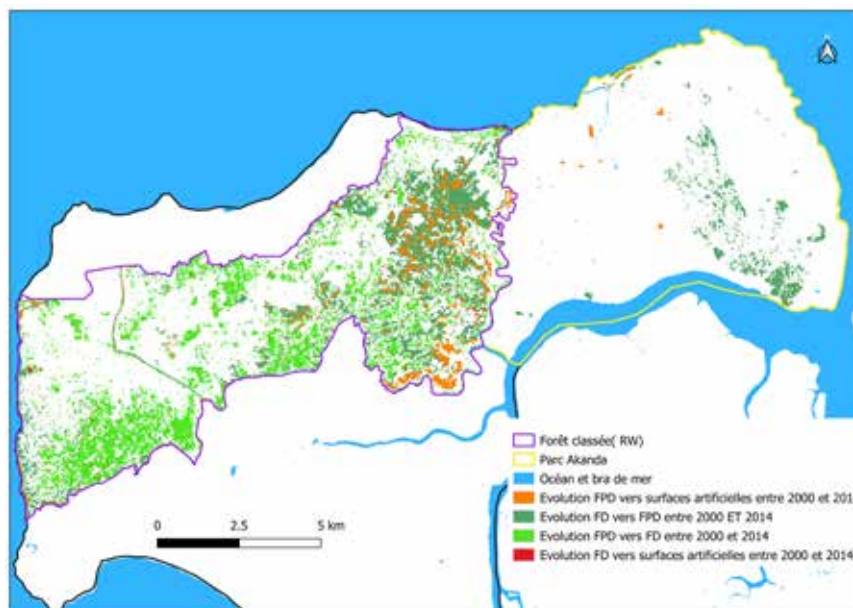


Figure 6 : Dynamiques des forêts denses et peu denses dans les zones protégées entre 2000 et 2014

Les pertes de forêts denses les plus importantes se localisent à l'extérieur du parc tandis que les gains de surfaces sont majoritairement à l'intérieur du périmètre protégé. Le bâti étant considéré ici comme un facteur de déforestation, un gain de sa surface est considéré comme un changement négatif. Entre 2000 et 2014, l'évolution du bâti est le principal facteur de dégradation et de déforestation au nord de Libreville et, particulièrement, dans l'Arborétum. Du point de vue de la protection des écosystèmes naturels, la progression du bâti ou des surfaces artificielles revêt un caractère négatif, surtout lorsque cette dernière se fait au détriment des écosystèmes forestiers comme c'est le cas dans la commune d'Akanda et autour de l'Arborétum. Pour l'ensemble du territoire, les changements négatifs (176,05 km²) dominent largement les changements positifs (40,06 km²) soit une différence de 81,69 km². Les surfaces totales perdues sont largement supérieures aux gains. Les phénomènes de régénération restent sous-représentés et ne permettent pas un retour vers l'état d'équilibre des écosystèmes forestiers. Ce constat est valable aussi bien à l'intérieur de la zone protégée qu'à l'extérieur. Ces données montrent clairement que les aires protégées du nord de Libreville sont en danger. La capacité des structures naturelles du paysage à s'auto reconstituer est faible à cause notamment d'une pression anthropique trop forte, qui condamne les écosystèmes de cette zone à une extinction progressive.

L'analyse des dynamiques de l'occupation du sol indique que le territoire est très instable. Cette instabilité du territoire désigne l'ensemble des variations spatiotemporelles des classes d'occupation du sol. Elle fait donc allusion aux pertes et gains de surfaces, aux modifications et aux dégradations. Seuls 72,90 km², soit 25 % de la surface du territoire, est resté stable ou sans changement entre les deux dates, alors que les surfaces affectées par les gains et les pertes représentent 75 % du territoire. Cette dernière donnée, indique que la zone d'étude subit de fortes pressions.

Modèle de transition des changements 2000-2014

Les parties précédentes ont permis la constitution d'une base de connaissance de la dynamique spatio-temporelle des catégories de l'occupation du sol par télédétection et SIG. Un sous-modèle repré-

sentant les transitions de toutes les classes d'occupation du sol vers les surfaces artificielles est défini (fig. 7) : c'est le sous-modèle *artificialisation*. Il décrit et quantifie dans le détail les transitions des écosystèmes forestiers (forêt dense, forêt peu dense, mangrove et cours d'eau) vers les espaces artificialisés. Les tendances ou les probabilités de changement de chaque classe ont été évaluées et caractérisées. En effet, lorsque le mode d'occupation du sol est la forêt, et qu'il se transforme en bâti, c'est un processus d'urbanisation dont la conséquence est la déforestation. Lorsque le mode d'occupation du sol est la forêt dense et qu'il se transforme en forêt peu dense, il s'agit de la transition vers la dégradation forestière qui marque aussi le début de l'artificialisation. Par ailleurs, si le mode d'occupation est la forêt peu dense et qu'il se transforme en forêt dense, il s'agit d'une régénération ou densification forestière. L'ensemble de ces mutations est représenté et schématisé sur la figure 7 et le tableau 4. Les phénomènes d'abandon ou de reforestation liés à un recul des espaces bâtis sont très peu probables ou nuls. Les espaces de forêt ne recolonisent pratiquement pas les espaces occupés par le bâti car cette mutation est souvent irréversible. Dans de très rares cas, et sur des surfaces très petites, les sols nus peuvent être recolonisés par la forêt. C'est cette principale mutation qui peut justifier une perte de surfaces artificielles, mais pas le bâti proprement dit. C'est donc un phénomène sous-représenté. Par ailleurs, les espaces de mangrove peuvent coloniser les cours d'eau ou, au contraire, perdre leur surface au profit des cours d'eau. Ces mouvements de régression et de progression de surface sont conditionnés par la croissance naturelle de ces forêts, par les saisons (de pluie ou sèche), les mouvements de marées ou par le rétrécissement ou grossissement des lits de rivière (dans certains cas entretenus par les pêcheurs).

Pour la modélisation de changements d'occupation du sol, seules les transitions significatives mesurant statistiquement le comportement et les trajectoires spatiotemporelles des unités du paysage ont été retenues. Le sous-modèle est élaboré à partir des données de la matrice de transition des catégories d'occupation du sol entre 2000 et 2014. Les structures les plus vulnérables et les plus instables sont les forêts peu denses suivies des forêts denses. Le tableau ci-dessous présente l'ensemble des données sur les transitions entre catégories d'occupation du sol.

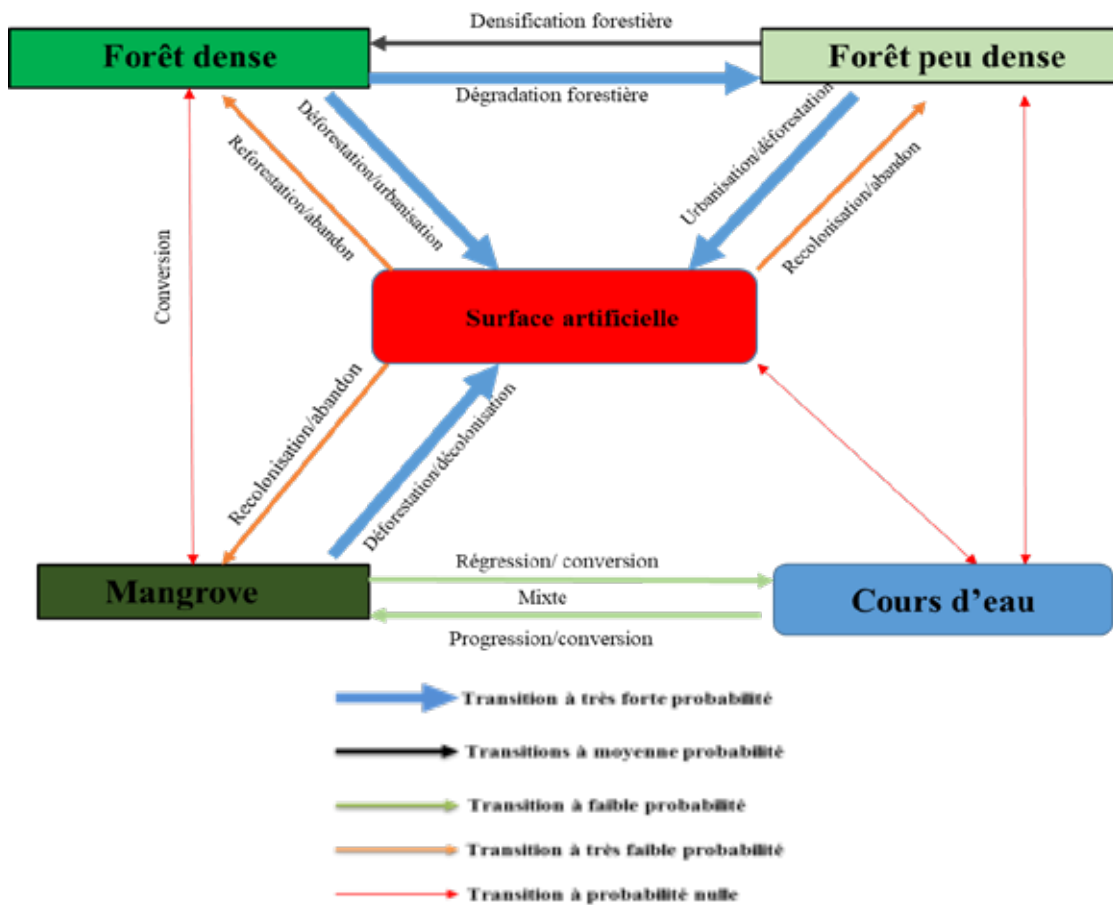
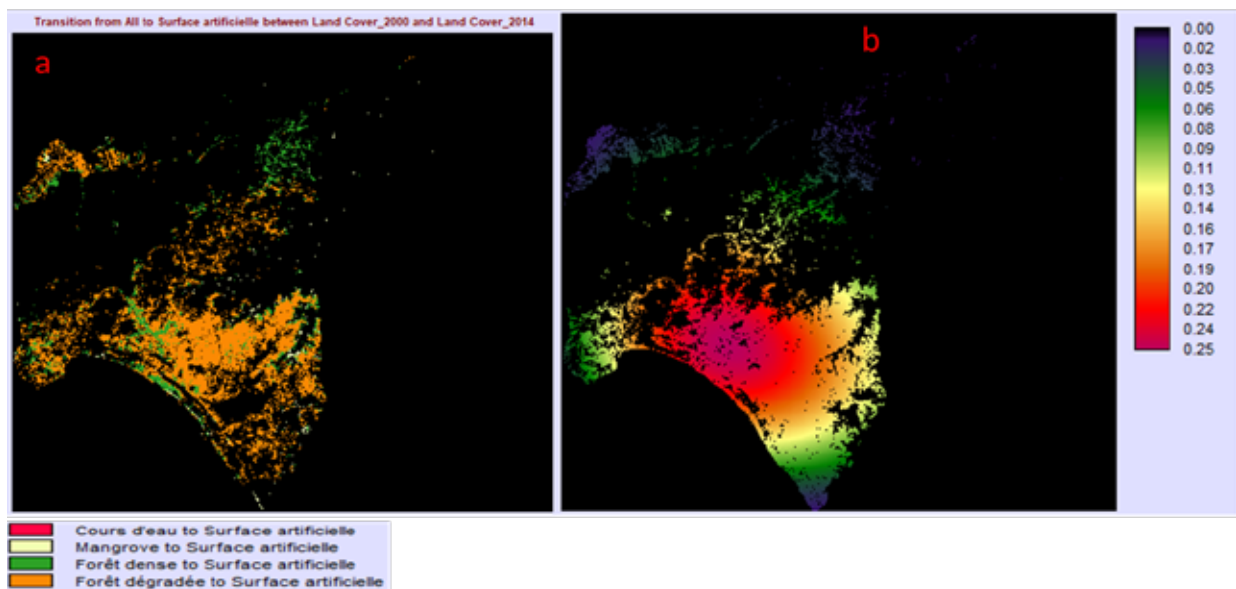


Figure 7 : Modèle de transition des changements d'occupation du sol au nord de Libreville, 2000-2014



Les valeurs correspondent au degré d'intensité des changements basé sur le sous-modèle "surfaces artificielles". Celui-ci exprime le degré de changement de toutes les classes vers les surfaces artificielles. Plus la valeur est élevée, plus le changement dans la classe est fort. Les valeurs proches de zéro signifient que le changement est très faible, et zéro exprime qu'il n'y a pas de changement dans la classe.

Figure 8 : a) Transition de toutes les catégories d'occupation du sol vers les surfaces artificielles ;
b) Intensité des transitions des classes vers les surfaces artificielles

		2000					
		Sa	Ce	Mg	Fd	Fpd	Total 2014
2014	Surfaces artificielles	26,01	0,21	1,84	6,77	33,47	68,3
	Cours d'eau	0,26	6,95	0,8	0,08	0,05	8,35
	Mangrove	0,02	1,79	52,55	2,21	0,09	56,66
	Forêt dense	0,07	0,02	8,65	82,19	14,96	105,89
	Forêt peu dense	1,23	0	0	13,02	35,78	49,82
Total 2000		27,59	8,97	63,84	104,27	84,35	289,0206
Changements dans les classes							
	Différence d'image	40,71	-0,62	-7,19	1,62	-34,5	

Réalisation : Mpié Simba, 2019. Données Landsat

Sa : Surface artificielle ; Ce : Cours d'eau ; Mg : Mangrove ; Fd ; Forêt dense ; Fpd : Forêt peu dense

Tableau 4 : Matrice de transition des catégories de l'occupation du sol de 2000 à 2014

L'analyse du modèle de transition de l'occupation du sol de la zone nord de Libreville montre que les changements d'occupation du sol ont une probabilité plus forte pour certaines classes d'occupation du sol et dans une localisation spécifique (fig. 8). La zone centre est celle qui a subi les changements les plus intenses. Elle correspond effectivement à la zone d'extension d'infrastructures importantes, notamment, la construction du stade de football en 2012 pour la coupe d'Afrique des nations avec sa zone hôtelière associée, la construction du centre hospitalier universitaire et le développement d'une zone résidentielle.

Essai de la modélisation prospective de l'occupation du sol

La prospective est une approche qui consiste à prévoir le devenir possible d'un territoire à partir de scénarios. Ces derniers sont des hypothèses élaborées à partir des données disponibles et de l'état des connaissances du phénomène étudié. La prospective associée aux techniques de la modélisation et de la simulation a été utilisée pour analyser les mutations possibles de l'occupation du sol dans la zone nord de Libreville. L'essentiel des données utilisées dans cette étape est constitué des données de référence issues de l'analyse des dynamiques de l'occupation du sol entre 2000 et 2014. La modélisation a été effectuée sur la base d'une matrice de transition obtenue par le croisement des cartes d'occupation du sol et permet de décrire les changements intervenus en mettant en évidence, et de façon condensée, les différentes transitions ou conversions subies par les unités d'occupation du sol entre deux dates (Schlaepfer, 2002). L'hypothèse de base de la matrice de transition considère que chaque

catégorie d'occupation des terres est constituée d'un nombre de cellules, chaque cellule a plus ou moins changé d'état pendant la période considérée (2000-2014). Ce changement d'état d'une catégorie vers une autre est traduit en probabilité de changement ou en facteur de conversion (Oloukoï *et al*, 2007). Le facteur de conversion de chaque catégorie d'occupation du sol est calculé à partir de l'équation 1.

Ces statistiques sont calculées à partir des données de superposition de l'occupation entre 2000 et 2014. Le facteur de conversion d'une catégorie d'occupation du sol à une autre prend en compte la somme des changements intervenus dans une classe et la superficie de la même classe en année de départ (fig.9). Par exemple, les surfaces de forêt (mangrove y compris) sont celles qui présentent les facteurs de changement les plus importants. En effet, entre 2000 et 2014, 35,78 km² de surface de forêts peu denses sont restés stables alors que 48,57 km² ont changé de catégorie, soit un facteur de conversion de 57,58 %. Aussi, si une partie de la surface de forêt dense en 2000 est restée stable en 2014, alors que 22,08 km² ont changé de catégorie, le facteur de conversion est de 21,17 %. Les surfaces de mangrove en 2000 présentent un facteur de conversion de 17,68%, les cours d'eau, un facteur de 14,25 % et les surfaces artificielles enregistrent le facteur de conversion le plus faible, soit 5,72 %. Ces facteurs de conversion ont été, par la suite, projetés sur deux horizons temporels, à savoir 2020 et 2028. Pour ce faire, les matrices de probabilité de transition de l'occupation du sol en 2020 et 2028 (en %) ont été élaborées (tableaux 5 et 6). Ces dernières déterminent pour un horizon temporel donné, la probabilité d'une classe d'occupation du sol à passer d'un état à un autre.

2020 2014	Ce	Mg	Fd	Fpd	Sa	Total
Ce	90,74	6,42	0	2,84	0	100
Mg	9,94	89,37	0,69	0	0	100
Fd	0	3,14	82,9	13,25	0,72	100
Fpd	0,05	0	30,13	36,64	33,18	100
Sa	0,02	0,17	0	7	92,81	100

Source : Simulation construite à partir des données Landsat 2000-2014

Tableau 5 : Matrice de probabilité (%) de transition de l'occupation du sol en 2020

2028 2014	Ce	Mg	Fd	Fpd	Sa	Total
Ce	80,48	14,31	0,04	5,17	0	100
Mg	1,63	77,92	4,48	14,26	1,71	100
Fd	0,02	5,27	72,18	14,77	7,76	100
Fpd	0,06	0,06	32,33	26,41	41,14	100
Sa	0,06	0,3	1,8	9,35	88,5	100

Source : Probabilités construites à partir des données Landsat 2000-2014

Tableau 6 : Matrice de probabilité (%) de transition de l'occupation du sol en 2028

Les projections 2020 et 2028

Sur la base des informations produites précédemment, nous avons réalisé deux projections suivant un scénario tendanciel. Celui-ci est élaboré à partir des données statistiques des changements réellement observés entre 2000 et 2014 et des données issues du calcul des probabilités de conversion de chaque catégorie d'occupation du sol. Ces projections traduisent la continuité des tendances actuelles, sans rupture majeure et intègrent les facteurs de changements déjà connus et dont la probabilité est forte. Les projections réalisées indiquent que la tendance à l'artificialisation et son intensité, constatée entre 2000 et 2014, se poursuivront à l'horizon 2020 et 2028. Dans l'ensemble, ces images des futurs possibles de l'occupation du sol permettent de localiser les espaces (à enjeu) soumis aux risques de déforestation et de dégradation forestière.

En 2020, les surfaces artificielles continuent à progresser principalement vers les forêts peu denses. Cette dernière catégorie présente une probabilité de stabilité très faible soit 36,64 %. Plus de 31,18 % de la surface des forêts peu denses est convertie au profit des surfaces artificielles, tandis que 30,13 % de la forêt dense change au profit de la forêt peu dense. Les surfaces de mangrove connaîtront une stabilité de 89,37 %. La probabilité que les mangroves se transforment en une autre catégorie est faible. Seul 10,63% de ses surfaces seront mutées soit en forêts denses (0,69 %), soit en eau (9,94 %). Le résultat cartographique de ce scénario montre une croissance des

surfaces artificielles au détriment des espaces de forêt, y compris à l'intérieur de l'aire protégée (fig.10). Néanmoins, la dynamique positive de l'évolution des forêts denses enregistrée entre 2000 et 2014 se poursuivra également en 2020. Ces dernières auront un gain de plus de 3 km² (tableau 7). L'Arborétum connaît une perte de forêt dense et une fragmentation forestière importante. Les surfaces de forêts peu denses de 2014, vont progressivement se transformer en surfaces artificielles à l'intérieur du parc. Elles seront presque totalement remplacées par le bâti. Entre 2014 et 2020, la croissance des surfaces artificielles est estimée à plus de 5 km². Dans ce scénario, la modification paysagère est très importante.

L'analyse de cette projection montre qu'à l'horizon 2028, pendant que les surfaces de forêt dense se régénèrent à l'intérieur du parc, les forêts peu denses régressent. Entre 2014 et 2028, ces deux classes vont passer de 105,98 à 108,45 km² pour les forêts denses et de 49,82 à 43,21 km² pour les forêts peu denses. Les surfaces de mangrove ont aussi une dynamique régressive mais elle reste faible. Elle est estimée à un peu plus de 1 km² en 2020 et 2028. Dans les deux projections, on constate qu'à l'intérieur du parc l'évolution des surfaces artificielles se fait en lieu et place des forêts peu denses. L'évolution des surfaces artificielles vers les forêts denses est très faible. De même, l'évolution des forêts denses à l'intérieur du parc se fait aussi au détriment des forêts peu denses. Ceci signifie que le processus de régénération forestière observé en 2014 dans les limites de la forêt classée

notamment de sa zone sud-ouest se poursuivrait en 2020 et 2028. L'analyse qualitative de l'environnement dans ces deux projections montre que les changements négatifs sont supérieurs aux changements positifs. Cette tendance indique que les dynamiques enregistrées entre 2000 et 2014 peuvent se poursuivre à l'horizon 2020 et 2028. Les surfaces naturelles des aires protégées ont été régénérées au détriment des surfaces artificielles. L'ensemble des données statistiques des deux projections est présenté dans le tableau ci-dessous.

Pour évaluer la capacité du modèle à reproduire vraisemblablement les dynamiques d'occupation du sol de 2020 et 2028, une simulation de l'occupation du sol en 2018 est réalisée, puis comparée à une carte d'occupation du sol réelle de 2018, en suivant la même démarche appliquée précédemment. Le modèle de transition d'occupation du sol observé entre 2000 et 2014 est exploité, les matrices de transition et les probabilités de changements des catégories sont déterminées. Dans l'ensemble, le processus de simulation permet d'appréhender les changements et les mêmes trajectoires entre l'occupation du sol réelle et simulée de 2018. La matrice de probabilité des transitions des catégories de l'occupation du sol déterminée pour 2018 (tableau 8) montre, par exemple, que la forêt peu dense, à l'instar des résultats de 2014, 2020 et 2028, a un taux de stabilité très faible, soit 37,68 %. Toutefois, celui-ci est plus important que celui de 2020 (36,64 %) et 2028 (26,41 %). On peut donc conclure, que la résolution temporelle est un facteur déterminant et que les temps d'itinérance jouent sur la quantité des changements. La matrice indique également qu'en 2018, les forêts denses vont enregistrer une régénération à l'intérieur du parc, notamment au sud-ouest, mais aussi une perte de surface principalement à l'extérieur des limites du parc. Cependant, cette dernière tendance, ne cadre pas avec la réalité sur le terrain en 2018 (fig. 11). Cet espace est plutôt occupé par les forêts peu denses. En outre, la simulation de 2018 prévoit des changements beaucoup plus importants dans les forêts du parc Akanda. La comparaison des deux résultats montre que le modèle amplifie les résultats, notamment ceux des surfaces artificielles. Toutefois, tous les changements qui se sont réellement opérés en 2018 ont été bien représentés par la simulation. Cela peut signifier que dans la zone d'étude, les changements d'occupation du sol obéissent à des logiques ou pratiques qui sont constantes, récurrentes et qui peuvent, dans une moindre mesure, se représenter par des projections de types linéaires.

En 2018, les surfaces artificielles réelles couvrent une superficie de 72,44 km², alors que les données projetées les estiment à 82,03 km², soit une surestimation

de plus de 9 km² (tableau 9). Celle-ci représente une marge d'erreur d'environ 11%. Malgré cette erreur, les surfaces artificielles projetées sont à plus 85 % concordantes avec la réalité. La forêt dense semble être bien représentée, car entre les deux cartes, elle n'enregistre qu'une faible sous-estimation, soit -1,98 km². La mangrove est la catégorie qui présente un taux de concordance très satisfaisant, avec une sous-estimation de seulement 0,78 km², soit une erreur de -1,42 %. La simulation de cette catégorie est donc concordante à plus de 98 %. Par ailleurs, les surfaces de forêts peu denses sont celles qui présentent le taux de sous-estimation le plus fort, soit -8,15 km². En effet, en 2018, la carte réelle de l'occupation du sol indique que cette catégorie couvre 45,04 km², alors que la carte simulée l'estime à 38,89 km², soit une erreur de 22,09 %. La carte réelle de 2018 présente très peu de surfaces artificielles dans le parc Akanda (fig. 11). Or, dans la carte simulée, on observe une multiplication des taches d'artificialisation. A l'intérieur de l'ARW, les surfaces semblent être très bien représentées entre les deux cartes. Par ailleurs, dans la carte réelle, à l'extérieur de l'Arborétum RW, les forêts denses au nord et au sud ont été remplacées par les forêts peu denses dans la carte simulée. Les limites du parc semblent être un frein au processus de progression du cadre bâti. Seuls les espaces de forêt peu dense déjà présents depuis 2014 poursuivent leur mutation. Dans l'ensemble, le niveau de coïncidence entre les cartes réelles et les cartes projetées, suivant une approche probabiliste et non déterministe, est satisfaisant. En d'autres termes, les cartes d'occupation du sol simulées ne sont pas le territoire, mais un état possible du territoire si, et seulement si, les dynamiques évoluaient dans le sens de l'hypothèse de départ (les dynamiques observées se poursuivaient avec plus ou moins la même intensité).

Discussion

Les processus d'urbanisation en cours dans la commune d'Akanda, au nord de Libreville, engendrent de profondes modifications des écosystèmes naturels. Ces mutations ont un impact négatif sur les aires protégées, notamment l'Arborétum Raponda Walker, qui perd progressivement ses surfaces de forêts. Historiquement, cette forêt classée couvrait une superficie de 10 200 ha en 1951 et a subi deux déclassements au cours des années 70 et 80. Les dégradations forestières observées sur la carte d'occupation du sol de l'année 2000, illustrées par la forte présence d'une forêt peu dense, témoignent de ces dynamiques passées. Depuis 2012, la superficie de l'aire protégée est de 6 747 ha. L'accroissement rapide de la population provoque l'urbanisation du territoire, par l'aménagement d'infrastructures et l'augmentation des logements. Ainsi, les formations végétales, malgré leur grande utilité

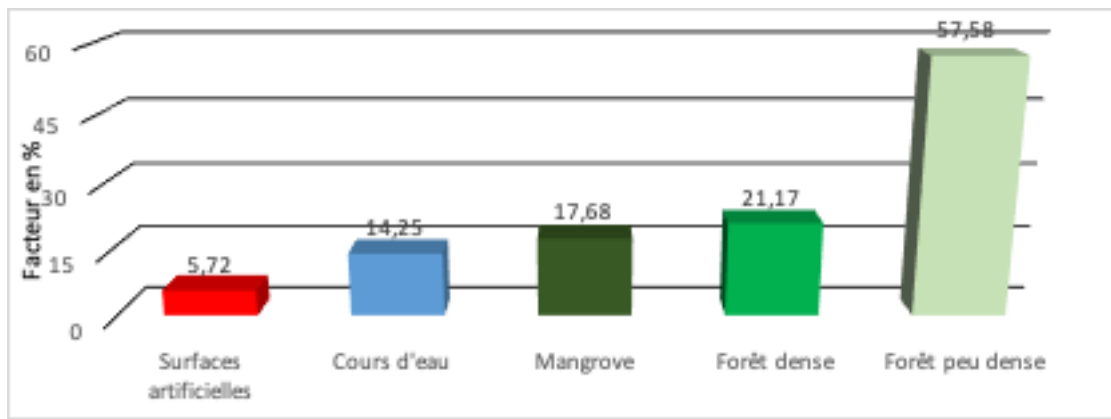
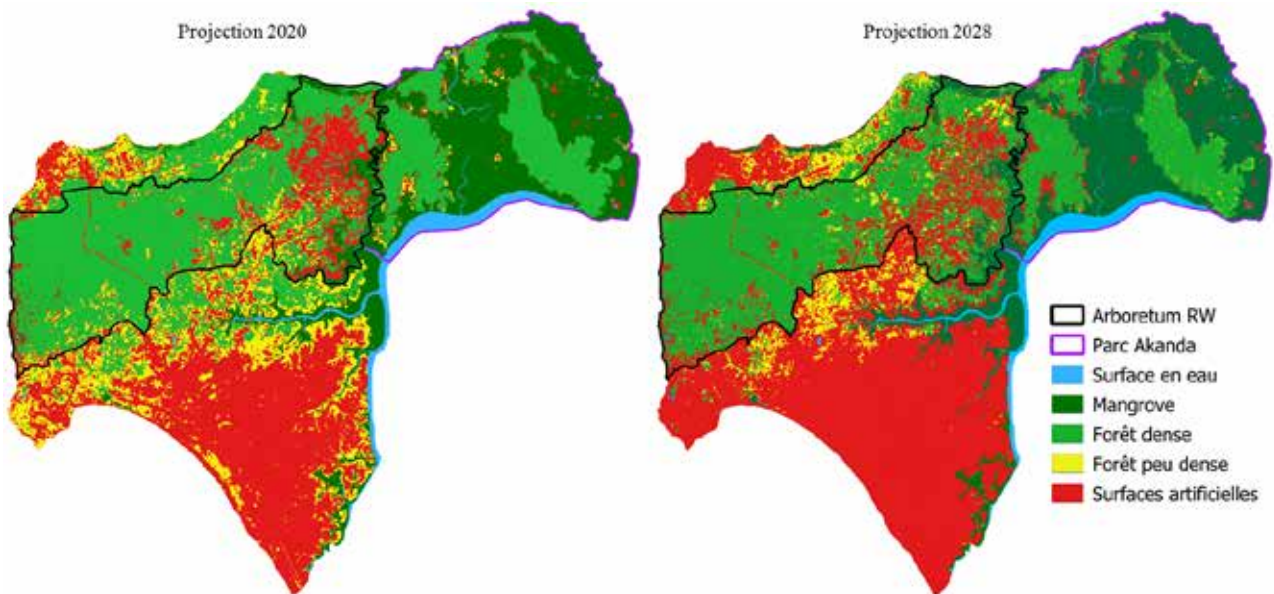


Figure 9 : Facteurs de conversion des catégories d'occupation du sol



Source : Scénarios élaborés d'après l'analyse des données Landsat, 2000, 2014

Figure 10 : Dynamique de l'occupation du sol à l'horizon 2020 et 2028

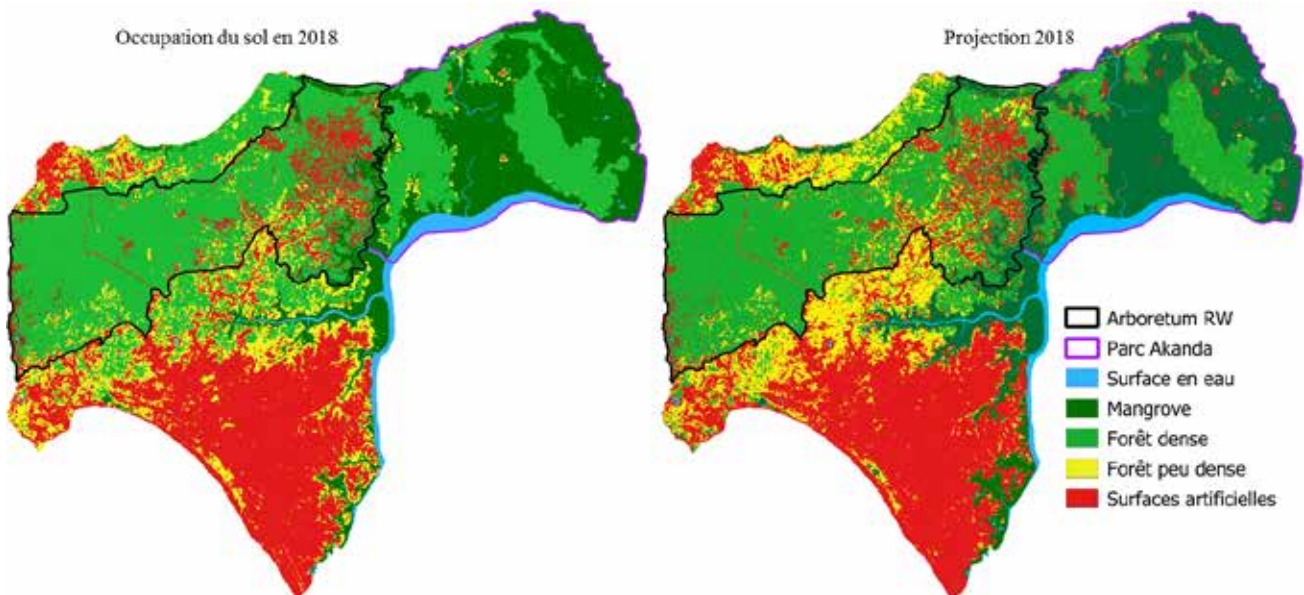


Figure 11 : Comparaison de l'état d'occupation du sol réel et simulé en 2018

CLASSES	2014, occupation réelle		Projection 2020		Projection 2028	
	Surfaces		Surfaces		Surfaces	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Surface artificielle	68,30	23,63	83,34	28,83	95,53	33,39
Forêt dense	105,89	36,64	99,24	34,33	94,20	32,05
Forêt peu dense	49,82	17,24	44,21	15,30	38,45	13,30
Mangrove	56,66	19,60	53,47	18,50	53,17	18,39
Cours d'eau	8,35	2,89	8,77	3,04	8,32	2,87
TOTAL	289,02	100	289,02	100	289,02	100

Source : Scénarios élaborés d'après l'analyse des données Landsat, 2000, 2014
Tableau 7 : Scénarios tendanciels de l'occupation du sol, 2020 et 2028

2014						Total
2000	Ce	Mg	Fd	Fpd	Sa	
Ce	93,47	4,36	0	2,17	0	100
Mg	0,39	90,45	0	7,16	2	100
Fd	0	2,35	82,58	13,69	1,38	100
Fpd	0,15	0,42	29,58	37,68	32,17	100
Sa	0,0	0,04	0,02	5,21	94,73	100

Source : Probabilité créée sur la base des cartes d'occupation du sol de 2000 et 2014
Tableau 8 : Matrice de probabilité de transition des classes d'occupation du sol en 2018

CLASSES	2018, occupation réelle		2018 simulée		Différence	
	Surfaces		Surfaces		Surfaces	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Surface artificielle	72,44	25,06	82,03	29,07	9,59	11,69
Forêt dense	107,24	37,10	105,26	36,41	-1,98	-1,88
Forêt peu dense	45,04	15,58	38,89	12,76	-8,15	-22,09
Mangrove	55,47	19,19	54,69	18,92	-0,78	-1,42
Cours d'eau	8,84	3,06	8,15	2,84	-0,69	-8,46
TOTAL	289,02	100	289,02	100	-	-

Source : Simulation construite à partir des données Landsat 2000-2014 et comparaison avec les données réelles Landsat, 2018

Tableau 9 : Données statistiques de l'occupation du sol réelle et simulée de 2018

pour les communautés, sont menacées par la déforestation et la dégradation forestière (FAO, 1999 et 2015). Certaines activités d'approvisionnement tendent aujourd'hui à disparaître du fait d'une anthropisation massive du territoire (Hosonuma *et al.*, 2012). L'équilibre entre urbanisation et préservation des aires protégées devient difficile, mais fait l'objet d'une réflexion active (ANPN, 2016).

Les impacts de l'étalement urbain, des changements d'occupation et d'utilisation des sols sur les structures paysagères et environnementales ont fait l'objet de beaucoup d'études, notamment dans les sciences de l'occupation et de l'utilisation du sol « *Land cover and Land use science* ». Le recours aux modèles spatiaux pour la compréhension et l'exploration des territoires est de plus en plus fréquent. En effet, comprendre les dynamiques passées liées à la configuration ou la fabrication des paysages, pour en expliquer le devenir possible est une question scientifique de plus en plus explorée dans le domaine de la recherche, notamment en géographie. Anticiper les réponses de l'environnement par rapport aux pressions anthropiques qu'il a subies peut aider à mieux orienter une décision, à choisir une action à mener au détriment d'une autre, pour une politique d'aménagement durable, de conservation, de planification. Les effets des actions anthropiques sur l'évolution du territoire ont été quantifiés (superficies) et qualifiés (dégradation forestière, dégradation, mitage). La projection de données statistiques liées à un phénomène peut donner des résultats satisfaisants et cette démarche a déjà fait ses preuves (Paegelow et Camacho Olmedo, 2004 ; Oloukoï *et al.*, 2007 ; Lecerf, 2008 ; Aguejdad et Houet, 2008, Aguejdad, 2009 ; Houet, 2015 ; Aguejdad *et al.*, 2016). En sciences sociales, notamment en géographie (étude des dynamiques d'occupation du sol), la difficulté ne réside pas dans la quantification du phénomène, mais plutôt dans sa localisation. La question « où s'opèrera le changement ? » devient centrale. Le modèle utilisé, *LCM*, rend possible l'exploration du territoire tout en quantifiant et en localisant les changements possibles. Les possibilités qu'offre cette plateforme pour ce type d'étude sont largement documentées (Mas *et al.*, 2011). Pour déterminer les facteurs responsables des dynamiques territoriales et prédire les transformations possibles, des projections ont été élaborées sur la base des dynamiques passées. Un sous-modèle est construit, les matrices de transition de l'occupation et les probabilités de changement sont définies afin d'étudier l'impact de l'évolution du bâti sur le couvert forestier et à l'intérieur de l'aire protégée. Les projections réalisées ont pour but d'attirer l'attention des gestionnaires du territoire et des décideurs sur les risques que courent les zones protégées si les dy-

namiques observées se poursuivaient avec plus ou moins la même intensité.

Du point de vue méthodologique, la méthode de simulation choisie (basée sur les probabilités de transition) a permis de représenter de manière spatiale explicite les changements d'occupation du sol en 2020 et 2028. Malgré quelques erreurs de surestimation et de sous-estimation des classes prédites, le modèle a bien représenté les dynamiques réellement observées en 2018. Les simulations sont réalisées de manière linéaire avec l'hypothèse que les facteurs de conversion et les dynamiques garderont la même intensité que celle observée entre 2000 et 2014. Quelques limites liées à la mise en œuvre du modèle peuvent être évoquées ici. Il s'agit des données en entrées du modèle limité et de l'absence d'autres facteurs explicatifs qui influencent le développement du bâti, tels que des données socio-économiques (coût du foncier etc.) ou biophysiques. Cette étape nécessite un traitement préalable qui permet de transformer les variables continues en catégorielles à partir desquelles seront calculées les probabilités de changements. *LCM* possède un module qui permet de transformer les variables en données quantitatives et ainsi de les intégrer à la modélisation, pour peu que les données soient disponibles. L'intégration de ces facteurs rendrait le modèle plus optimal, car ils conditionnent aussi certaines dynamiques paysagères. Aussi, les scénarios basés sur les seules tendances du passé ne permettent pas de représenter les situations de rupture. De plus, la modélisation effectuée dans le cadre de cette étude est basée sur des images Landsat, d'une résolution de 30 m, qui n'ont pas permis l'identification fine de l'occupation du sol. Le recours aux données d'une meilleure résolution permettrait d'affiner la précision des résultats. Malgré ces limites, ces images ont permis d'atteindre les objectifs fixés et de modéliser les grands ensembles des dynamiques de l'occupation du sol.

Conclusion

Dans le cadre de cette étude, l'objectif était de mettre en lumière les dynamiques spatiales présentes et futures de la périphérie Nord de Libreville. Les résultats qui en découlent (cartes et statistiques) constituent des outils d'aide à la décision pour la prévention des risques de déforestation et de dégradation forestières des zones protégées. Les résultats produits sont d'ordre quantitatif, qualitatif et spatial. Les dynamiques observées dans la zone révèlent un problème de préservation des aires protégées. Ces pressions sont liées à une forte anthropisation du territoire principalement caractérisée par l'étalement du bâti, dont plusieurs lotissements dans la zone d'étude, et

la déforestation ou la dégradation forestière. Le modèle utilisé permet d'analyser et comprendre les mutations spatiales des territoires. Son interface est basée sur une approche inductive de simulation de patrons spatiaux et a permis de tester deux projections suivant un scénario tendanciel. Celui-ci est réalisé en projetant sans contrainte les dynamiques observées. L'analyse comparée de ces deux projections a conduit à explorer l'étalement du bâti, source des dégradations. Le modèle a simulé la fragmentation ou le mitage des forêts, voire la dégradation et la déforestation progressive des forêts dans les aires protégées. Il a permis d'identifier les surfaces qui constituent des enjeux et sur lesquelles les changements ou dégradations pourront s'opérer. Ce résultat cache de forts enjeux fonciers dans la zone d'étude. L'analyse des deux projections, 2020 et 2028, permet donc de tirer plusieurs enseignements :

- Les scénarios permettent d'identifier précisément les surfaces qui constituent des enjeux forts du fait de leur localisation et qui peuvent potentiellement basculer dans l'urbain. Ils démontrent surtout la porosité actuelle de l'Arborétum, qui admet en son sein la présence d'une forte activité humaine et du bâti. L'étalement urbain, qui se poursuivrait jusqu'en 2020 et 2028 sur le rythme qui fut le sien entre 2000 et 2014, condamnerait l'Arborétum Raponda Walker à une perte de ses forêts qui pourrait nécessiter une redéfinition de ses contours.
- Globalement, les surfaces de forêt peu dense vont poursuivre leur mutation et se transformer en surfaces artificielles en 2020. Ce changement s'intensifiera en 2028. Mais en réalité, la présence des forêts peu denses constitue la marque d'une anthropisation du territoire. Ces surfaces sont des lieux dans lesquels se pratiquent des activités humaines (agriculture de transition, occupation foncière).
- Les forêts denses semblent se régénérer en 2020 et 2028 comparativement aux années 2000 et 2014. Cette tendance est plus forte dans les limites de la forêt protégée. Ceci

traduit donc un effet positif de la politique de conservation des forêts, corroborant les propos de Beresford *et al.*, (2013) sur les dynamiques de l'ensemble des sites de conservation. En outre, la progression des surfaces de forêt dense traduit que le modèle a aussi simulé les processus d'auto-régénération des forêts.

- En 2020 et 2028, la mangrove enregistre une légère perte de sa surface au profit des surfaces artificielles. C'est un milieu naturellement hostile au cadre bâti. Les dégradations de mangrove sont aussi liées à d'autres activités comme la pêche, le prélèvement de bois de mangrove pour le fumage de poisson.
- Les informations quantitatives fournies montrent que l'intensité des changements n'est pas la même pour chaque catégorie d'occupation du sol. La classe ayant le facteur de conversion le plus élevé est la forêt peu dense, suivi de la forêt dense et la mangrove. Cette information indique que les écosystèmes naturels de la zone nord sont en danger. Leur facteur de dégradation principal est le bâti.
- L'intensité des changements est plus forte à l'extérieur des aires protégées qu'à l'intérieur (corroborant les travaux de Manembe, 2001). Cependant, l'intensité de changement de la forêt peu dense est plus importante à l'intérieur de l'Arborétum. Aussi, la transition forêt dense à forêt peu dense est plus forte à l'intérieur du parc, car l'essentiel de la surface de forêt dense se localise dans le parc.

Ces changements en cours et à venir menacent l'intégrité de l'Arborétum Raponda Walker et auront des implications certaines sur la qualité des écosystèmes. La modélisation des dynamiques d'occupation du sol au nord de Libreville représente un outil précieux d'aide à la réflexion en termes de prospective territoriale, avec un fort enjeu de préservation des écosystèmes naturels.

Bibliographie

Agence nationale des parcs nationaux (ANPN), (2016). *Dynamiques spatiales et impacts environnementaux des extensions urbaines dans l'Arc d'Emeraude*. UICN, CEM, WWF.

Aguejidad R., Doukari O., Houet T. *et al.*, (2016), « Etalement urbain et géoprospective : apports et limites des modèles de spatialisation ». *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 782, mis en ligne le 14 juin 2016, consulté le 27 novembre 2019. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/27668> ; DOI : 10.4000/cybergeo.27668

Aguejidad R., (2009), *Etalement urbain et évaluation de son impact sur la biodiversité, de la reconstitution des trajectoires à la modélisation prospective. Application à une agglomération de taille moyenne : Rennes Métropole*. Thèse en géographie, Université Rennes 2 Haute-Bretagne.

Aguejidad R., Houet T., (2008), "Modeling of urban sprawl using the Land Change Modeler on a French metropolitan area (Rennes): foresee the unpredictable", *International Symposium "Spatial landscape Modelling: from dynamic approaches to functional evaluations"*, Toulouse, 3-5 June 2008

Beresford A. E., Eshiamwata G.W., Donald P.F. *et al.*, (2013), "Protection Reduces Loss of Natural Land-Cover at Sites of Conservation Importance across Africa". *PLoS ONE*, vol. 8, n°5. e65370. URL: <https://doi:10.1371/journal.pone.0065370>

Congalton R. G., (1991), "A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data". *Remote sensing of environment*, vol. 37, n°1, p. 35-46.

El Hadraoui, Y., (2013), Étude diachronique de l'occupation du sol et de modélisation des processus érosifs du bassin versant du Bouregreg (Maroc) à partir des données de l'Observation de la Terre. Mémoire en Sciences de l'ingénieur, ESGT. HAL Archives-ouvertes.fr. dumas-00920465

Eloy L., Le Tourneau F.-M., (2009), « L'urbanisation provoque-t-elle la déforestation en Amazonie ? Innovations territoriales et agricoles dans le nord-ouest Amazonien (Brésil) ». *Annales de géographie*, 2009/3, n° 667, p. 204-227. DOI: 10.3917/ag.667.0204. URL: <https://www.cairn.info/revue-annales-de-geographie-2009-3-page-204.htm>

FAO, (1999), *State of the world forests*. Rapport technique.

FAO, (2010), *Foresterie urbaine et périurbaine en Afrique. Quelles perspectives pour le bois-énergie ?* Document de travail sur la foresterie urbaine et périurbaine, n°4, Rome.

FAO, (2015), Évaluation des ressources forestières mondiales : Comment les forêts de la planète changent-elles? 2^e édition. URL : <http://www.fao.org/docrep/013/i1757f/i4793f.pdf>

Ferchichi A., (2017), Propagation et réduction des incertitudes dans les modèles de changement d'occupation des sols. Thèse de doctorat, Laboratoire de Recherche en Génie Logiciel, Applications distribuées, systèmes décisionnel et Imagerie intelligente. Université de Manouba.

Hosonuma N., Herold M., De Sy V. *et al.*, (2012), "An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries". *Environmental Research Letters*, vol. 7.

Houet T, (2015), « Usages des modèles spatiaux pour la prospective ». *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 25, n° 1, p. 123-143.

Jenerette G.-D., Poterie D., (2010), "Global analysis and simulation of land-use change associated with urbanization". *Landscape Ecology*, vol. 25, p. 657-670.

Lecerf R., (2008), *Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (application à la Bretagne)*. Sciences de la Terre. Université Rennes 2, 2008. Français. fftel-00337099f

- Maloba Makanga, J. D., (2011), *Les précipitations au Gabon : climatologie analytique en Afrique*, Paris, L'Harmattan
- Manembe S.M., (2001), *Cartographie évolutive de l'occupation du sol à partir des données de télédétection multisources. (Application à la forêt classée de la Mondah)*, Mémoire de fin de cycle DESS TMGIE, Gabon, Université Omar Bongo / École Nationale des Eaux et Forêts.
- Mas F., Kolb M., Houet T. *et al.*, (2011), « Éclairer le choix des outils de simulation des changements des modes d'occupation et d'usages des sols. Une approche comparative ». *Revue Internationale de Géomatique*, p. 405-430.
- Mpié Simba C., (2016). *Évaluation des changements de l'occupation du sol à l'aide des images satellitaires dans la zone de Bambouchine-Bikélé entre 1990 et 2014*. Mémoire de Master, Gabon, Université Omar Bongo, Département de Géographie.
- Ngana F., Sougnabe P., Gonne B., Ababa A. M., (2009), « Transformations foncières dans les espaces périurbains en Afrique centrale soudanienne ». *Actes du colloque Savanes africaines en développement: innover pour durer*. Avril, Garoua, Cameroun. 9 p. cirad-00471275
- Okanga-Guay M., (2013), « Cartographie de l'extension urbaine et de la pression sur l'environnement : le cas de la périphérie nord de Libreville, Gabon ». *Revue gabonaise de géographie*. N°5, LANASPET, Université Omar Bongo, Gabon, p. 5-23.
- Oloukoï J., Mama V. J., Agbo F. B., (2007), « Modélisation de la dynamique de l'occupation des terres dans le Département des collines au Bénin ». *Télédétection*, vol.6, n°4, p. 305-323.
- Paegelow M., Camacho Olmedo M.T., (2004), "Possibilities and limits of prospective GIS land cover modeling - a compared case study: Garrotxes (France) and Alta Alpujarra Granadina (Spain)". *International Journal of Geographical Information Science*.
- Peltier R., (2019), « Quelles évolutions pour la consommation d'énergie domestique et la gestion des ressources naturelles dans les bassins d'approvisionnement des grandes villes du Sud ? ». *Bois et Forêts des Tropiques*, vol. 340, 2e trimestre – Avril, p. 3-12.
- RGPL 1993 Direction générale de la statistique et des études économiques, (1993), *RGPL 1993... Recensement général de la population et de l'habitat*. Libreville.
- RGPL 2013 Direction générale de la statistique, (2015), *RGPL 2013... Résultats globaux du Recensement Général de la Population et des Logements de 2013 du Gabon*. Libreville.
- Schlaepfer M.A., Runge M.C., et Sherman P.W., (2002), "Ecological and evolutionary traps". *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 17, n°10, p. 474-480.
- Tente B., Baglo M. A., Dossoumou J. C., Yedomonhan H., (2011), « Impacts des activités humaines sur les ressources forestières dans les terroirs villageois des communes de Glazoué et de Dassa-Zoumè au centre-Bénin ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 5, n°5, p. 2022-2030.
- Therriault M., Sparfel L., Gourmelon F. et Le Berre I., (2011), « Modélisation des changements d'occupation et d'utilisation du sol. Cadres formels et exemple d'application ». *Revue internationale de géomatique*. DOI: 10.3166/geo.21.267-295
- Trefon T., (1997), « Une exploitation durable des produits forestiers par les citoyens d'Afrique centrale: une gageure? », dans *Villes du sud et environnement, Travaux de la Société d'écologie humaine*, Éditions de Bergier.
- Voiron-Canicio C., (2012), « L'anticipation du changement en prospective et des changements spatiaux en géo-prospective ». *L'Espace géographique*, vol. 41, n°2, p. 99-110.