

CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION DU SOL DU GABON EN 2015; CHANGEMENTS INTERVENUS ENTRE 2010 ET 2015

Farrel Nzigou Boucka¹, Conan Obame Vassily¹, Francis Manfoumbi¹, Armel Nzue Mba¹, Michel Ngui Ondo¹,
Vanessa Ovono¹, Aboubakar Mambimba Ndjoungui¹

¹ Agence Gabonaise d'Etudes et d'Observations Spatiales (AGEOS)
Zone Économique Spéciale de Nkok, PK27, Parcelle N°27, 3850 Libreville, Gabon
Tel: +241 11 74 17 16 - Fax : +241 11 74 17 16 - Mail : ageosinfos@ageos.ga

Résumé

La cartographie de l'occupation du sol du Gabon en 2010 et 2015 et celle des changements entre ces deux dates a été réalisée dans le cadre du programme OSFACO¹ par l'Agence Gabonaise d'Etudes et d'Observations Spatiales (AGEOS). Il s'agit de la première carte d'occupation du sol de référence à l'échelle nationale dont la légende est issue d'une concertation des acteurs majeurs du secteur forestier gabonais. Cette carte a été obtenue en affinant celle du couvert forestier du Gabon (forêt/non forêt) obtenue dans le cadre des projets OSFT² et GEOFORAFRI³. La cartographie s'est basée sur l'utilisation des images satellitaires SPOT 5/7, Sentinel 2 pour l'année 2015 et les images SPOT 4, ASTER et ALOS 1 pour l'année 2010. Les méthodes de classification semi-automatisée et d'amélioration manuelle ont été combinées pour une meilleure précision des classes d'occupation du sol. Les résultats obtenus mettent en évidence 10 classes d'occupation du sol représentant les grands ensembles paysagers du pays, dominés par les forêts qui occupent 89% de la superficie totale du Gabon en 2015. Les classes d'occupation du sol qui ont le plus évolué entre 2010 et 2015 sont les forêts, les savanes, les terres agricoles et les surfaces artificialisées. Les principales pertes en forêt sont liées à la conversion des forêts vers les surfaces artificialisées, les terres cultivées et les sols nus. Les gains en forêt les plus importants quant à eux sont observés au niveau de la fermeture des pistes forestières. La validation du produit, réalisée par une équipe indépendante de celle qui a produit la carte, s'est basée sur une donnée de référence issue d'un plan d'échantillonnage combinant une composante systématique et aléatoire suivant la méthodologie de Sannier et al. (2016). L'analyse de la correspondance entre la donnée d'occupation du sol produite et la donnée de référence a permis d'estimer la précision globale à 95%.

Mots-clés : Occupation du sol, Gabon, classification semi-automatisée, plan d'échantillonnage, donnée de référence, Télédétection.

Abstract

The mapping of the land use of Gabon in 2010 and 2015 and the changes between these two dates was carried out as part of the OSFACO program (Space observation of Central and Western African Forests) by the Gabonese Agency for Space Studies and Observations (AGEOS). This is the first reference land use map at the national level, including the legend resulting from a consultation of major players in the Gabonese forest sector. This map was obtained by refining the forest cover map of Gabon (forest / non-forest) obtained in the framework of OSFT (Spatial Observation of Tropical Forests) and GEOFORAFRI project (Capacity building and access to earth observation satellite data for monitoring forests in Central and Western Africa). The mapping was based on the use of SPOT 5/7, Sentinel 2 satellite images for the year 2015 and the SPOT 4, ASTER and ALOS 1 images for the year 2010. Semi-automated classification method and Manual enhancement were combined for better accuracy of land use classes. The results obtained highlight ten land use classes representing the country's large landscape groups dominated by forests which occupied 89% of the total area of the country in 2015. The most dynamic land use classes are forests, savannas, agricultural land and artificial surfaces. The main forest losses are linked to the conversion of forests to artificial surfaces, cultivated land and bare soils. The most significant gains in forest are observed at the level of the closure of forest roads. The validation of the product, carried out by an independent expertise from the map production team, was based on a reference data resulting from a sampling plan combining a systematic and random component according to the methodology of Sannier et al. (2016). The analysis of the correspondence between the land use map produced and the reference data gave an overall accuracy of 95%.

Keywords: Land use, Gabon, semi-automated classification, sampling plan, reference data, Remote sensing.

1. Introduction

La cartographie de l'occupation du sol et de son évolution au Gabon a toujours été l'objet de nombreuses difficultés

du fait de la forte persistance nuageuse sur le pays. De nombreuses études en ont déjà fait état telles que Michez (2006), De Wasseige et al. (2010), Makanga (2011), Sannier et al. (2013) et plus récemment Miyono et al. (2019). Afin de pallier cette limite, l'approche

¹ Observation Spatiale des Forêts d'Afrique Centrale et de l'Ouest, projet financé par l'Agence Française de Développement (AFD), de 2016 à 2020.

² Observation Spatiale des Forêts tropicales, projet financé par l'AFD, de 2011 à 2015.

³ Renforcement des capacités et accès aux données satellitaires pour le suivi des forêts en Afrique Centrale et de l'Ouest, projet financé par le Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM), de 2012 à 2017.

méthodologique par couvertures temporelles nationales d'images satellitaires a déjà connu un certain succès. La couverture temporelle encore appelée pivot correspond à une date ou année repère intégrant un intervalle de temps sur une ou plusieurs années selon le pas de temps choisi pour la détection de changements mais aussi la persistance nuageuse. Ces différentes études déjà réalisées, étant cependant limitées pour certaines sur le nombre de classes représentées et pour d'autres sur leur étendue spatiale, n'ont jamais permis l'obtention d'une carte d'occupation du sol à l'échelle du pays avec une précision assez fine pour en apprécier les détails et les spécificités locales. La mise en œuvre du programme OSFACO au Gabon a permis de combler ce manque à travers sa composante de mise à disposition gratuite de données satellitaires de haute résolution SPOT récentes et historiques, et d'appui à la production locale de cartographie d'occupation du sol et de ses changements. L'objectif était donc de produire une carte de l'occupation du sol du Gabon en 2015 et 2010 et des changements entre ces deux dates afin que le pays dispose désormais d'une donnée de référence en la matière. Le programme OSFACO a hérité des projets OSFT et GEOFORAFRI qui avaient déjà pour objectifs la promotion de l'observation spatiale pour la gestion des forêts. Les produits déjà réalisés dans le cadre de ces projets tels que la carte du couvert forestier du Gabon en 2010 et 2015 ont donc servi de référence pour la cartographie de l'occupation du sol. Afin que la donnée une fois produite soit représentative des réalités géographiques du pays, l'Agence Gabonaise d'Etudes et d'Observation spatiale (AGEOS) ayant la charge de la cartographie a lancé un processus de consultation de l'ensemble des acteurs (Opérateurs forestiers, Organisations Non Gouvernementales, Ministères sectoriels...) intervenant dans les grands thèmes d'occupation du sol afin de définir une nomenclature des classes à cartographier. Cela a permis de déterminer et harmoniser l'ensemble des classes devant servir de base au travail de classification de l'occupation du sol selon les deux grands ensembles paysagers « Forêt » et « Non-forêt » :

- Catégorie « forêt » : Forêt dense, Forêt secondaire, Forêt marécageuse, Forêt inondée, Mangrove, Forêt galerie.
- Catégorie « non-forêt » : Zone humide, Savane, Zone d'agriculture ou d'élevage, Plan d'eau artificiel, Plan d'eau naturel, Sol nu, Surface artificialisée.

Cette légende provisoire était cependant soumise à l'analyse des images satellitaires afin de déterminer quelles étaient réellement les éléments discriminables au moyen de la télédétection.

2. Outils et méthodes

2.1 Zone d'étude

Le Gabon s'étend sur une surface de 267 667 km², de part et d'autre de l'Equateur, dans le Golfe de Guinée (figure1). Il possède une façade maritime de 800 km de long sur l'Océan Atlantique (FAO, AQUASTAT 2005). Selon le recensement national de 2013 de la Direction Générale de la Statistique du Gabon (2015), la population résidente est

de 1 811 079 habitants avec une densité démographique au niveau national de 6,8 habitants au km². La population est essentiellement urbaine (87 %) et concentrée sur 1,1 % seulement du territoire national avec plus de 3700 habitants au km² à Libreville (capitale politique et administrative) et 2 480 habitants au km² à Port-Gentil (capitale économique). Le pays baigne dans un climat tropical, avec en moyenne 2 897 mm de pluie par an, dont la moyenne thermique annuelle est de 25,9°C comme à Libreville. Sur l'ensemble du pays, il y a opposition entre une saison sèche qui s'étale seulement sur trois mois (juin, juillet et août), et une longue saison humide de neuf mois environ (Maloba-Makanga et Samba, 1997). Le système hydrographique est composé d'un abondant réseau de cours d'eau permanents. Le grand bassin versant de l'Ogooué domine ceux, plus modestes, des fleuves côtiers Nyanga et Komo. La région du Bas-Ogooué, qui correspond au delta intérieur de l'Ogooué, abrite la plus grande concentration de lacs du Gabon (FAO, AQUASTAT 2005).



Figure 1 : Zone d'intérêt

2.2 Données utilisées

La collecte de données a été réalisée en considérant un pas de temps permettant d'obtenir une couverture d'images satellitaires suffisante pour chaque année de référence (2015 et 2010) sur l'ensemble du pays. Ainsi selon cette méthode déjà éprouvée par Sannier et al. (2013), des images datant de plus ou moins deux ans par rapport aux années 2015 et 2010 ont été acquises. Les images acquises pour l'année 2015 sont constituées de 71 images SPOT 6/7, de 6 m de résolution spatiale (figure2) et de 112 images Sentinel 2, en n'utilisant que des bandes à 10m de résolution spatiale (figure 3) afin de couvrir l'ensemble du pays en images exploitables. Des images Landsat 8 (30 m de résolution spatiale), ont également été utilisées pour certaines zones n'ayant pas obtenu une bonne couverture malgré les images déjà acquises, surtout au niveau du centre du Gabon. La détection de classes difficilement discriminables par télédétection optique telles que les forêts inondées a nécessité l'utilisation de données radar ALOS1 en bande L ($\lambda=23.6$ cm) (figure 4). La bande L a l'avantage d'avoir une meilleure pénétration de la canopée et permet donc d'obtenir des informations sur les éléments de sous-bois comme les forêts inondées (Frison et al., 2019).

Certaines informations sont parfois difficiles à distinguer via la seule interprétation visuelle des images satellitaires

même à très haute résolution. Il est donc toujours nécessaire de les corrélés à des données au sol. Cinq campagnes de terrain (figure 5) ont ainsi été réalisées à travers le pays. Des prises de vues drones ainsi que de levés GPS de paysages spécifiques (forêts inondées, cultures, prairies aquatiques ...) afin de mieux les discriminer sur les images satellites et aussi renforcer la base de données de validation des cartes produites.

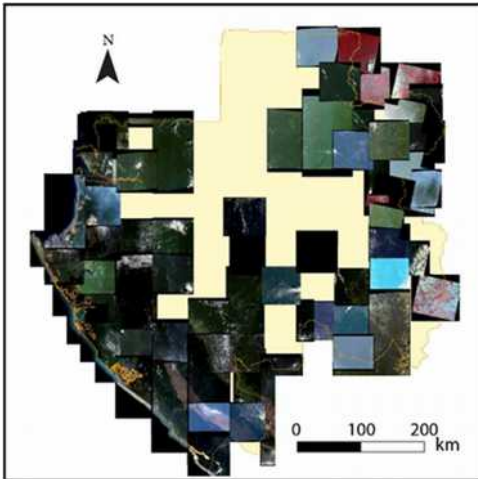


Figure 2 : Images Spot 6/7 pivot 2015.

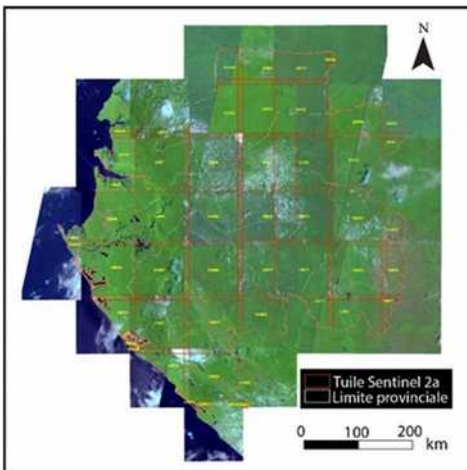


Figure 3 : Images Sentinel 2 pivot 2015.

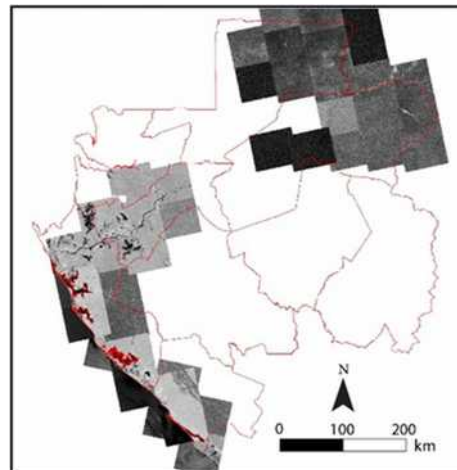


Figure 4 : Images Radar ALOS 1.

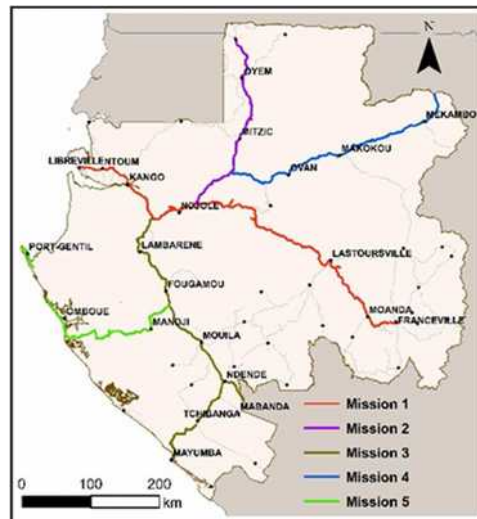


Figure 5 : Itinéraires des missions de terrain.

Pour la cartographie des changements entre 2010 et 2015, 108 images SPOT 4 (20 m de résolution spatiale) ont été acquises (figure 6). Ces données ne couvrant pas la totalité du territoire, elles ont été complétées par des images Aster (15 mètres de résolution spatiale) (figure 6).

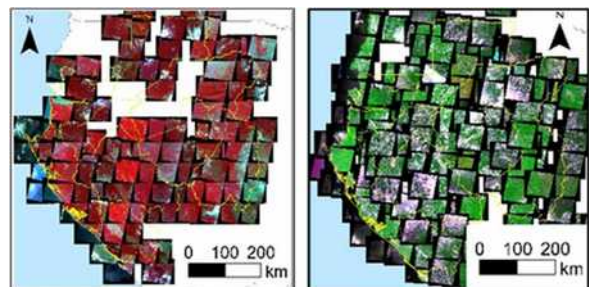


Figure 6 : Images Spot 4 (gauche) et Aster (droite) pour l'année de référence 2010

2.3. Traitements

La zone d'intérêt a été divisée en 112 scènes selon le découpage des tuiles de Sentinel 2 et chaque scène a été traitée séparément.

Il s'agissait premièrement de réaliser des masques de nuages et d'ombres pour chaque image. Ces masques ont permis d'extraire pour chaque image les pixels d'ombres et de nuages (Sannier et al., 2013). Cette opération a été réalisée pour l'année 2015. Pour l'année 2010, l'approche privilégiée a consisté à estimer par photo interprétation l'importance de la couverture nuageuse à l'intérieur d'une grille de 100 km² prédéfinie. Une couverture de donnée a ainsi été générée afin d'estimer et localiser les zones couvertes ou non couvertes par l'ensemble des images acquises.

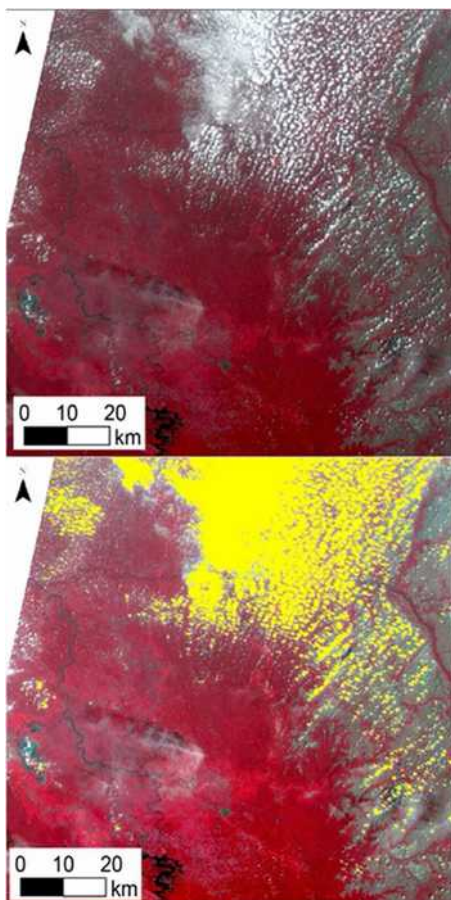


Figure 7 : Masque de nuages sur une image Sentinel 2. Image non masquée (en haut) et image masquée (en bas). Scène "33 MUU" (Franceville, Poubara) (Lat. 1°30'11.03 "S, Lon. 13°27'37.16" E)

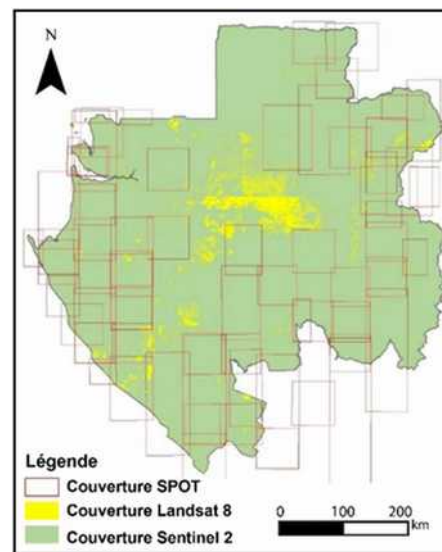


Figure 8 : Couverture de données pour l'année de référence 2015.

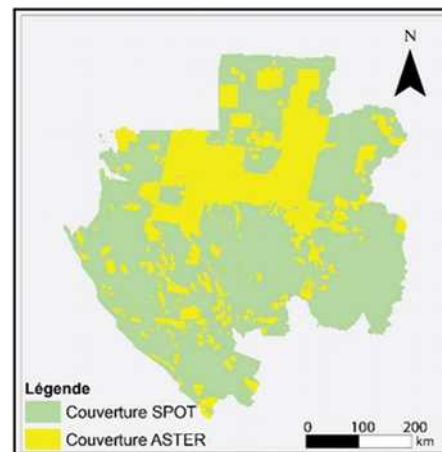


Figure 9 : Couverture de données pour l'année de référence 2010.

L'étape suivante a consisté à séparer les ensembles « forêt » et « non-forêt » de la donnée du couvert forestier du Gabon en 2015. Chaque masque « forêt » et « non-forêt » ainsi obtenu a été appliqué à chaque image Sentinel 2 (figure 10). Ces images ont été utilisées pour l'application du masque car ayant couvert la majorité du pays par rapport aux images SPOT.

Une fois les ensembles « forêt » et « non-forêt » séparés sur chacune des images Sentinel 2, une classification non supervisée basée sur l'algorithme ISODATA a été réalisée afin de discriminer les classes d'occupation du sol (figure 11). Le paramétrage de la classification a permis d'obtenir 20 à 40 classes spectrales selon l'image utilisée afin de s'assurer de la représentativité des classes thématiques (Sannier et al., 2013). Par la suite une reclassification manuelle a été effectuée, le résultat vectorisé et les deux ensembles recombinaés pour chacune des scènes traitées. Les classes dès lors produites ont été améliorées manuellement par photo interprétation en se basant en priorité sur les images SPOT 6/7 à très haute

résolution spatiale (6 mètres) (figure 12 et 13). Les scènes sur lesquelles les images SPOT 6/7 étaient indisponibles pour des raisons de forte nébulosité ont été complétées par les images Sentinel 2 ou Landsat 8 (figure 8). Par ailleurs, afin de s'assurer de la conformité de la donnée produite par rapport au respect de la nomenclature, des spécifications surfaciques et de la conformité topologique, un contrôle qualité a été réalisé. Le contrôle de la nomenclature a consisté à vérifier que la table attributaire du produit final ne comporte pas d'erreurs de codes ; celui des spécifications surfaciques a permis de s'assurer qu'aucun polygone ne soit inférieur aux unités minimales de cartographie définies pour chacun des grands ensembles « forêt » et « non-forêt », et le contrôle topologique de la donnée a permis de s'assurer que la donnée ne comporte pas de problème de géométrie (trou, superposition, etc...).

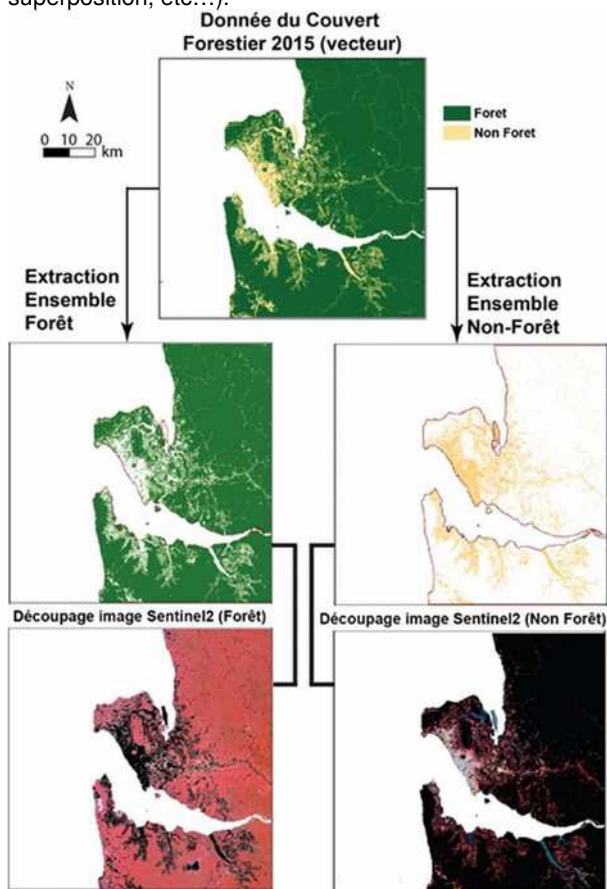


Figure 10 : Extraction de la classe « Forêt » et de la classe « Non-Forêt » de la donnée du couvert forestier 2015 puis d'une image satellitaire dans la zone de Libreville (date du 07/11/2017, scène 32 NNF Sentinel 2).

La Convention des Nations Unies pour la lutte contre le Réchauffement climatique a servi de référence pour la définition de la superficie minimale de cartographie car le Gabon ne dispose pas encore d'une définition officielle de la forêt. Selon cette définition, il s'agit d'une superficie minimale de 0,05 à 1 hectare (ha) avec un couvert forestier allant de 10 à 30% avec des arbres pouvant atteindre un minimum de 2 à 5 m de haut à maturité (UNFCCC, 2006).

Conformément aux travaux de Sannier et al. (2016), La superficie minimale de cartographie prise en compte est de 1 hectare pour les classes de l'ensemble « forêt ». Pour les classes de l'ensemble « non forêt » la superficie minimale de cartographie considérée est de 0,5 hectare.

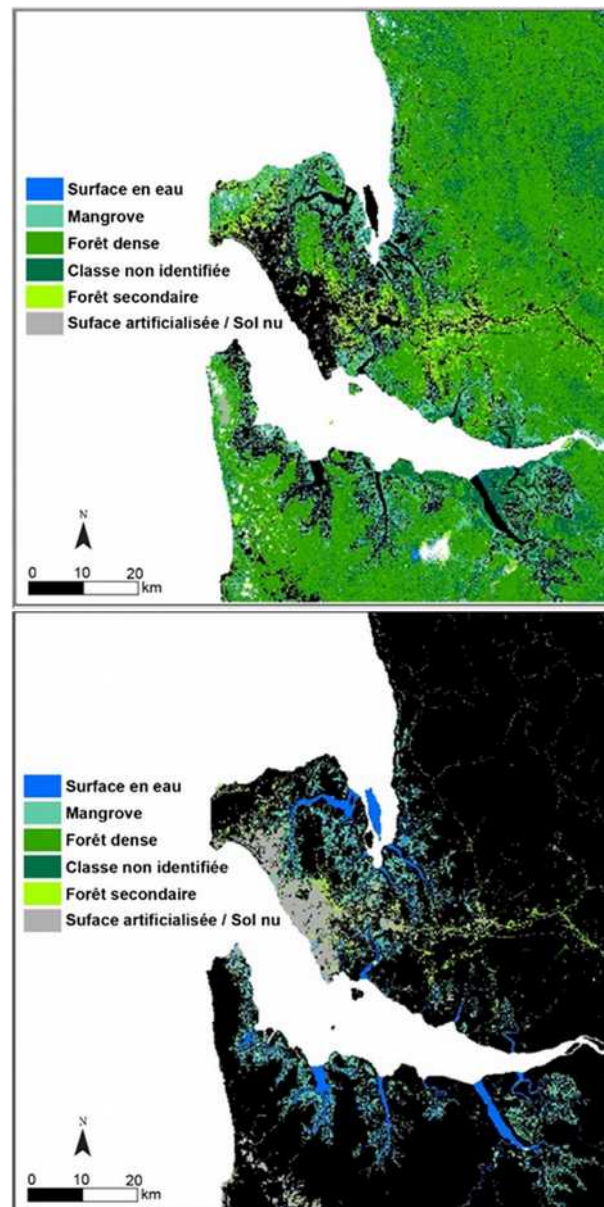


Figure 11 : Exemple de classification semi-automatique avant amélioration manuelle. Classes « Forêt » (haut) et « Non-Forêt » (bas) (scène 32 NNF Sentinel 2, Lat.0°24'10.51"N, Lon. 9°32'16.13"E).

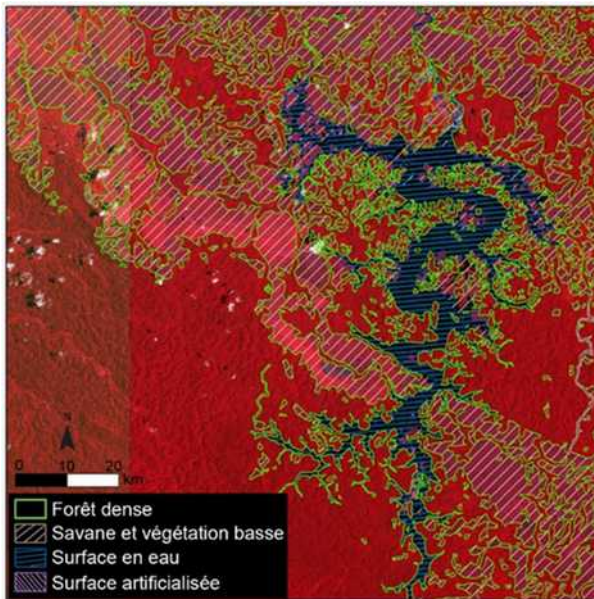


Figure 12 : Région de Poubara et SUCAF avant amélioration manuelle des classes d'occupation du sol (Image SPOT6/7, Lat. 1°46'17.51"S, Lon. 13°33'0.72"E., date du 10-04-2016).

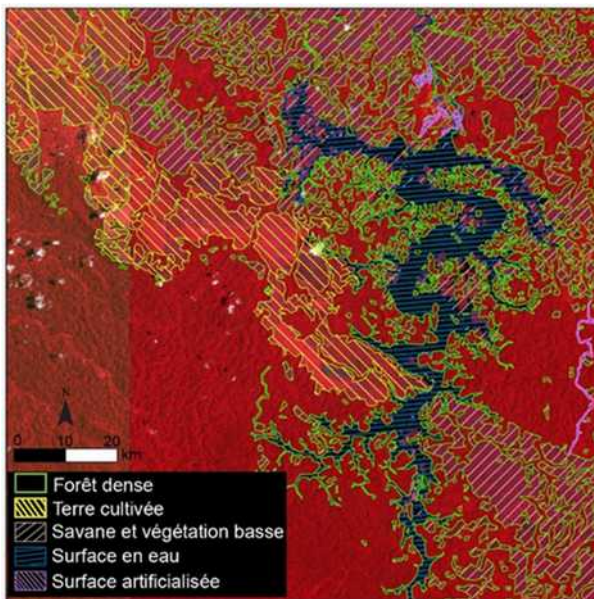


Figure 13 : Région de Poubara et Sucaf après amélioration manuelle des classes d'occupation du sol (Image SPOT6/7, Lat. 1°49'37.10"S, 13°28'56.77"E., date du 10-04-2016).

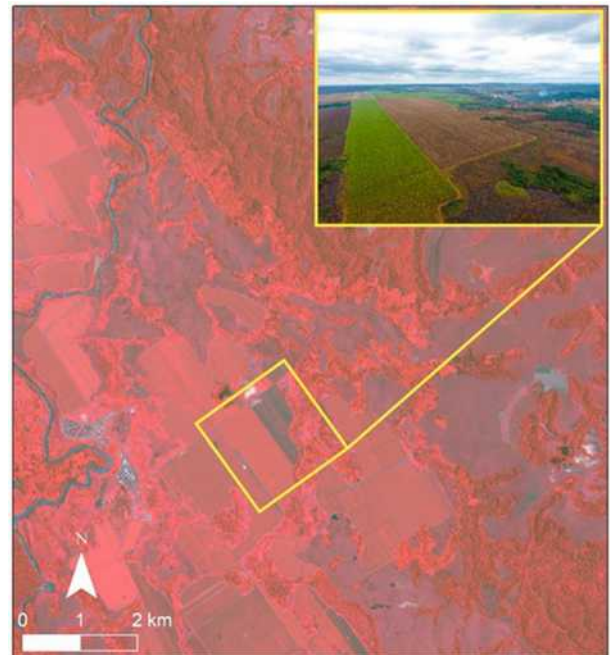


Figure 14 : Photo aérienne des plantations de Cannes à sucre Sucaf ayant servi à l'amélioration manuelle des classes d'occupation du sol (Image SPOT6/7, Lat. 1°43'51.19"S, 13°24'13.77"E, date du 10-04-2016).



Figure 15 : Photo aérienne de mangroves sur la route Port-Gentil-Omboué (Image SPOT6/7, Lat. 1° 6'15.98"S, 8°58'19.78"E, date du 27-06-2015).

Les données Radar ALOS 1 ont permis d'identifier les classes de forêts inondées et prairies aquatiques. Ces images en bande L sont particulièrement adaptées pour le suivi de ce type de milieu du fait de la meilleure pénétration dans le couvert végétal. L'apparence lumineuse des forêts inondées et des prairies aquatiques sur les images radar

résulte de rétrodiffusions à double rebond entre les surfaces d'eau lisses et les troncs ou les branches d'arbres (Wang et al., 1995).

Un seuillage d'amplitudes de la polarisation HH a été réalisé afin de délimiter les zones de forêt inondée et prairie aquatique. Les travaux de Richards et al. (1987) ont déjà montré l'efficacité de cette polarisation en bande L pour la discrimination des forêts inondées (figure 16). Un modèle numérique d'élévation (MNE) a également été utilisé afin de mieux mettre en évidence ces classes suivant le critère du relief.

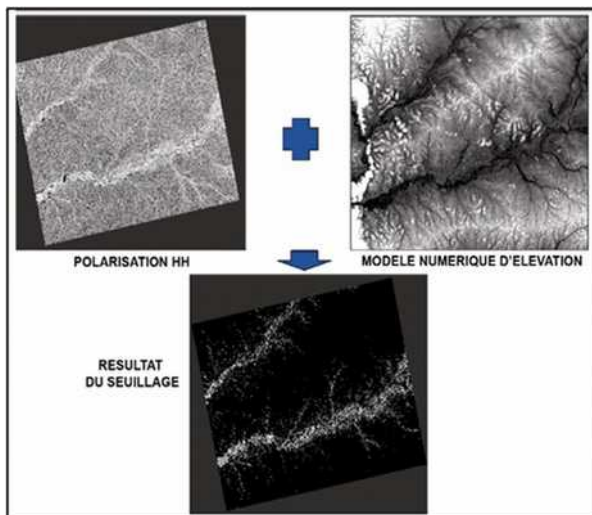


Figure 16 : Identification des forêts inondées et des prairies aquatiques par seuillage de la bande HH des images Radar ALOS 1 et du MNE.

La figure 17 est un exemple de comparaison entre la détection des forêts inondées sur une image optique Aster et sur une image radar ALOS 1. On constate notamment une meilleure discrimination de cet élément paysager sur l'image radar. Les classes de forêt inondée et prairie aquatique ayant une rétrodiffusion similaire sur les images Radar ont dû être discriminées par photo interprétation à l'aide des images optiques (Sentinel 2, SPOT 6/7).

La donnée ainsi produite puis vectorisée a été ensuite intégrée à la donnée générale avec toutes les classes d'occupation du sol déjà détectées.

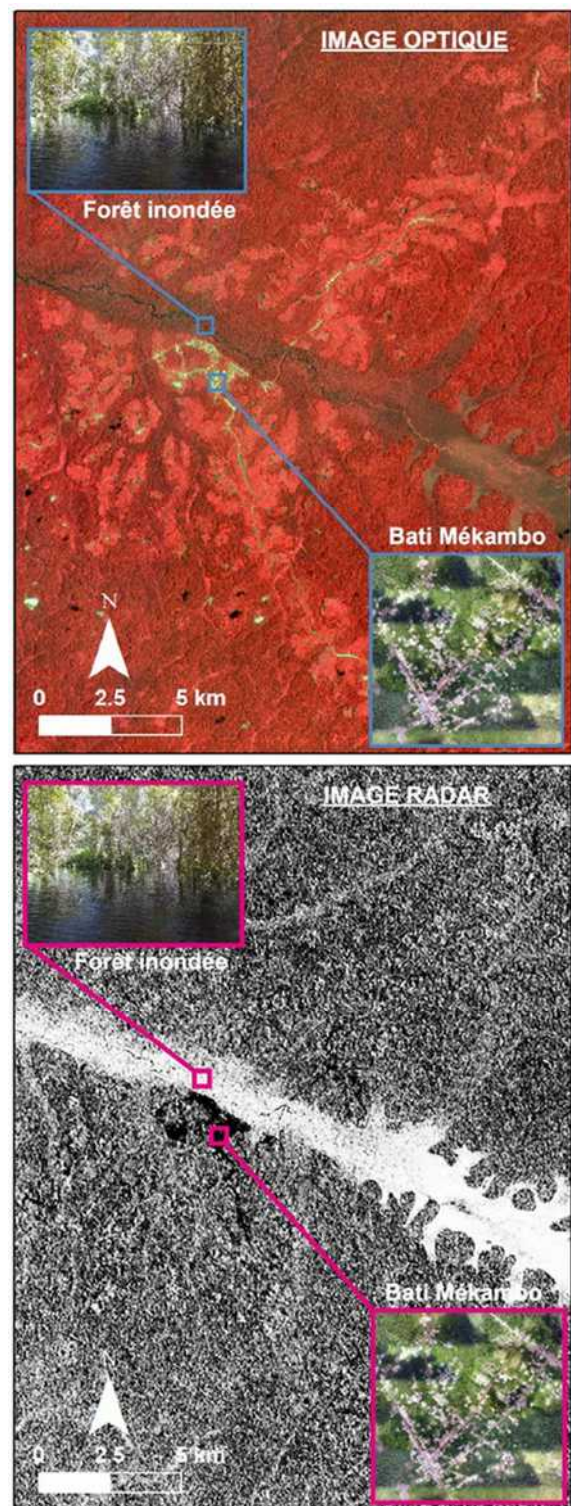


Figure 17 : Comparatif entre les forêts inondées sur une image optique ASTER et sur une image RADAR ALOS 1 en polarisation HH (Vue sur le centre urbain de Mékambo et vue sur sous-bois de forêt inondée de la rivière Zadié), (Lat. 1° 0'42.50"N, Lon 13°58'16.15"E).

3. Résultats et discussion

L'analyse des images satellitaires en 2015 a permis de mettre en évidence 10 classes d'occupation du sol sur l'ensemble du pays par rapport aux 13 classes initialement définies par les parties prenantes. L'ensemble « forêt », représenté par quatre classes (forêt dense, forêt secondaire, forêt inondée et mangrove) reste dominant sur l'ensemble du pays avec un pourcentage de 89% du territoire (figure 18 et 19). L'ensemble « non forêt » quant à lui, est représenté par six classes (terre cultivée, sol nu, prairie aquatique, savane et végétation basse, surface en eau et surface artificialisée). Les deux classes les plus représentées sont les forêts denses avec 21 972 551,73 ha soit 82,85 % et les savanes et végétations basses avec 1 956 108,54 ha soit 7,38 % du territoire (Tableau 1).

Classe d'occupation du sol	Superficie (ha/%)	
	Etat 2015	
Forêt dense	21 972 551,73	82,85
Forêt secondaire	845 985,94	3,19
Forêt inondée	615 112,42	2,32
Mangrove	189 028,02	0,71
Terre cultivée	152 259,43	0,57
Sol nu	37 067,43	0,14
Zone marécageuse	204 522,33	0,77
Savane et végétation basse	1 956 108,54	7,38
Surface en eau	386 969,83	1,46
Surface artificialisée	162 909,83	0,61

Tableau 1 : Superficie des classes d'occupation du sol en 2015.

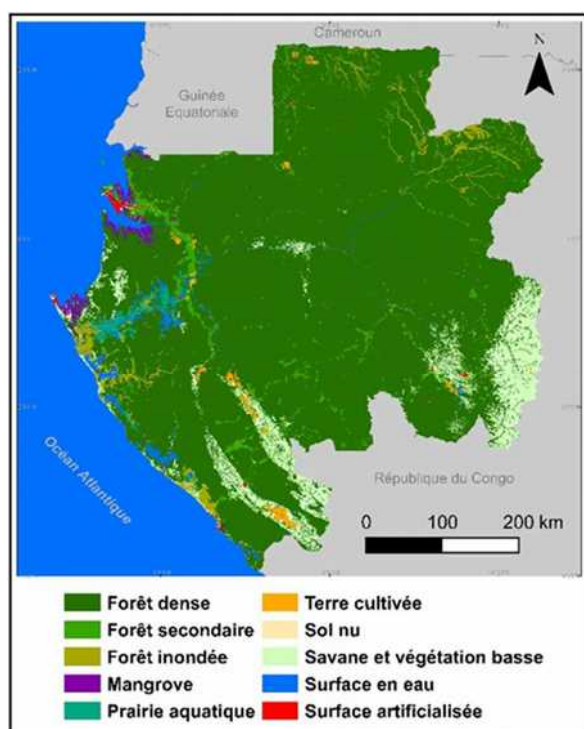


Figure 18 : Etat de l'occupation du sol du Gabon en 2015

Classe d'occupation du sol	Superficie (ha/%)	
	Etat 2010	
Forêt dense	22 043 381,71	83,11
Forêt secondaire	835 664,96	3,15
Forêt inondée	615 112,42	2,32
Mangrove	189 115,55	0,71
Terre cultivée	83 430,17	0,32
Sol nu	34 132,39	0,13
Zone marécageuse	203 591,80	0,77
Savane et végétation basse	1 977 213,69	7,45
Surface en eau	383 259,02	1,45
Surface artificialisée	157 613,80	0,59

Tableau 2 : Superficie des classes d'occupation du sol en 2010.

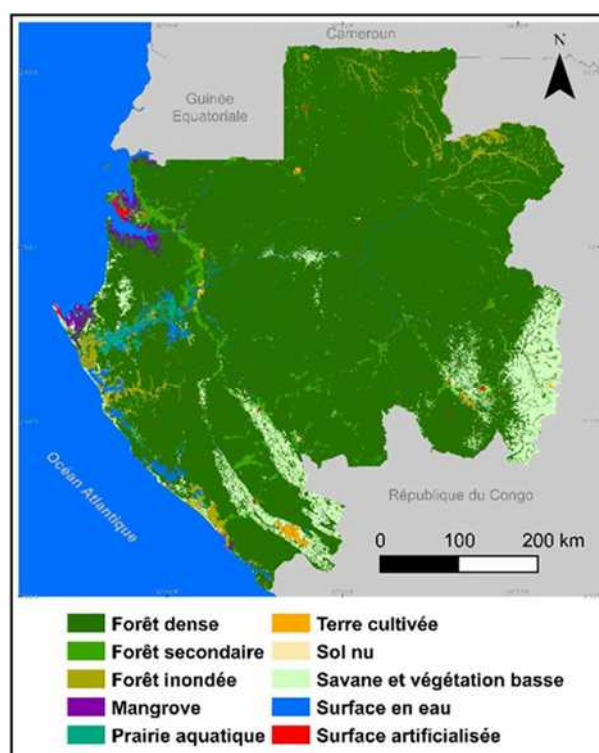


Figure 19 : Etat de l'occupation du sol du Gabon en 2010

L'analyse croisée des statistiques révèle que les classes d'occupation du sol avec le plus de changements sont les forêts, les savanes, les surfaces artificialisées et les terres agricoles. Ainsi, l'analyse des changements d'occupation du sol entre 2010 et 2015 s'est focalisée sur ces trois grands ensembles paysagers (Figure 20).

Entre 2010 et 2015 les pertes des forêts s'élèvent à 70 174,165 ha. Les principales pertes sont liées à la conversion des forêts vers les surfaces artificialisées, les terres cultivées et les sols nus. Les gains de forêt s'élèvent à 9 577,64 ha. Les gains les plus importants sont observés au niveau de la fermeture des pistes forestières.

Concernant la savane et la végétation basse, les pertes s'élèvent à 31 721,04 ha. Ces pertes sont liées principalement à la conversion des savanes et de la végétation basse vers les surfaces artificialisées, les terres cultivées et la forêt. Les pertes les plus importantes

observées sont la conversion des savanes et des forêts en terres cultivées avec 27 915,69 ha. Les gains s'élèvent à 10 615,89 ha.

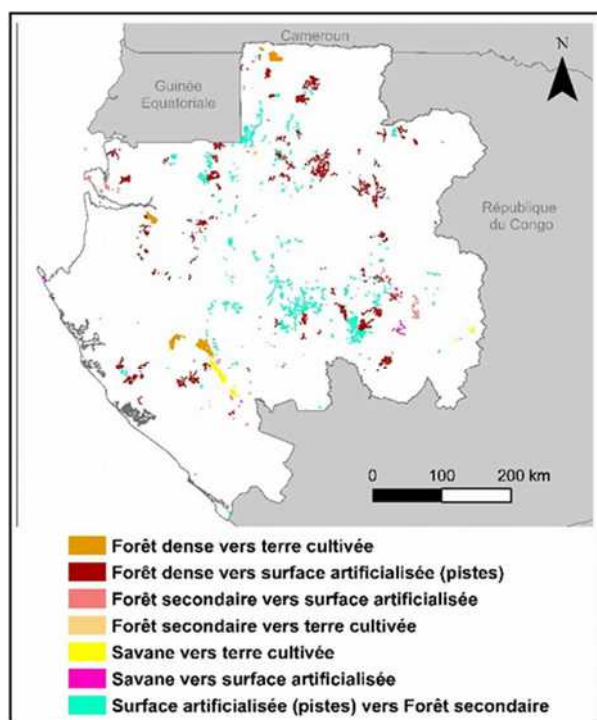


Figure 20 : Changements de l'occupation du sol du Gabon entre 2010 et 2015.

La validation de la cartographie de l'occupation du sol s'est basée sur les 665 segments précédemment utilisés pour valider les cartes Forêt/non-Forêt des années 1990 / 2000 / 2010 / 2015 (Fichet et al., 2013). Ces segments ont été réinterprétés afin de s'adapter à la nomenclature d'occupation du sol de la carte. Le plan d'échantillonnage est celui qui avait été développé dans le cadre des travaux de Sannier et al. (2016) et représente un échantillonnage combinant une composante systématique et aléatoire.

Cet échantillonnage a permis de couvrir de manière satisfaisante les classes thématiques et il n'a pas été nécessaire d'appliquer une approche par stratification telle que celle décrite par Olofsson et al. (2014) qui se serait justifiée si certaines classes thématiques n'avaient pas été représentées. L'interprétation s'est basée sur les images Spot 6/7 et Sentinel 2 qui ont été utilisées dans la production de la carte. Les autres données mises à disposition (images à très haute résolution spatiale, orthophotos et observations terrain) ont été utilisées pour calibrer l'interprétation notamment pour les classes thématiques complexes, compte tenu du fait que ces données permettent un niveau de détail plus fin, mais qu'elles ne sont pas disponibles sur tous les échantillons et l'ensemble du territoire gabonais (figure 14 et 15).

Au sein de chacun des 665 segments (PSU : primary Sample unit), 25 points (SSU : secondary sample unit) ont été tirés de manière aléatoire et utilisés pour générer une matrice de confusion. Le total des SSU utilisés est donc $665 \times 25 = 16\,625$ points.

La donnée de référence (REFERENCE 2015) est considérée comme vérité de terrain car issue d'observations basées sur les données de validation. Ces données de validations étaient composées d'images satellitaires THR, orthophotos par acquisition d'images drone, points GPS, photos obtenues durant les cinq missions de terrain réalisées (acquisition de 4318 images aériennes à partir desquels 48 orthophotos ont été produites) ou auprès des parties prenantes intervenant sur le terrain (ONG, Ministère des Eaux et forêt, Agence Nationale des Parcs Nationaux, Opérateurs, etc.). La donnée de référence a été produite par une expertise indépendante de l'expertise de production de la carte afin d'assurer une objectivité significative dans les interprétations des échantillons (Fichet et al., 2013). La matrice de confusion (tableau 3) a été obtenue par croisement de la donnée de référence avec la donnée de production. A partir de la matrice de confusion nous avons extrait les précisions de l'utilisateur et du producteur, qui représentent respectivement les erreurs de commission et d'omission (Hudson, 1987). Dans cette étude, la précision globale est de 95% pour un intervalle de confiance de 0.0034. Cependant, bien que non significatives par rapport à la précision globale, certaines confusions restent à signaler entre quelques classes d'occupation du sol telles que les forêts inondées et les prairies aquatiques ou les terres cultivées et les savanes et végétation basses. Ces confusions peuvent s'expliquer par les images utilisées pour l'analyse qui ne permettent pas forcément une discrimination optimale de ces classes-là qui ont une réponse spectrale souvent semblable.

- Résultats de la matrice de confusion (tableau 3) :

Précision Globale : 0,947 ;

Intervalle de confiance de 0,0034.

Formule de calcul de l'intervalle de confiance IC :

$$IC = 1,96 \frac{1}{n}$$

p = précision globale (résultat matrice de confusion) ;

n = total de la distribution.

- Légende du tableau 3 :

C0 : forêt dense,
 C1 : forêt secondaire,
 C2 : forêt inondée
 C3 : mangrove,
 C4 : terre cultivée,
 C5 : sol nu,
 C6 : savane et végétation basse,
 C7 : surface en eau,
 C8 : surface artificialisée,
 C9 : prairie aquatique.

		REFERENCE 2015												
		C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Total	Précision utilisateur (%)	Intervalle confiance 95 %
MAP 2015	C0	13257	35	75		8	2	57	15	47	9	13505	98,2	0.002
	C1	255	307	6		26	2	7	2	8	6	619	49,6	0.039
	C2	93		311	3	1		1	3	1	2	415	74,9	0.042
	C3	5		1	102						11	119	85,7	0.063
	C4	3				37		22		6		68	54,4	0.118
	C5	7			1	1	11	5	1		1	27	40,7	0.185
	C6	56	2			2	1	1231	2	4		1298	94,8	0.012
	C7	10	3		1			2	342	1	2	361	94,7	0.023'i
	C8	21	4	1				2		76		104	73,1	0.085
	C9	11	1	27		1			1		68	109	62,4	0.091
	Total	13718	352	421	107	76	16	1327	366	143	99	16625		
	Précision Producteur (%)	96,6	87,2	73,9	95,3	48,7	68,8	92,8	93,4	53,1	68,7			
	Intervalle confiance 95%	0.003	0.035	0.042	0.040	0.112	0.227	0.014	0.025	0.082	0.091			

Tableau 3 : Matrice de confusion

Par ailleurs, la démarche selon laquelle des images sont acquises sur plus ou moins 2 ans par rapport à une année de référence présente cependant des limites. En effet bien que les images les plus proches de l'année de référence soient prioritaires sur le choix des données, la persistance nuageuse peut emmener la collecte à la limite extrême de plus ou moins 2 ans par rapport à l'année de référence. Par conséquent un changement d'occupation du sol survenu en 2012 pourrait par exemple être considéré comme l'état de l'occupation du sol en 2010 et ne plus apparaître comme un changement entre 2010 et 2015, ce qui biaiserait la dynamique entre les deux dates.

4. Conclusion

Les résultats de cette étude démontrent une fois de plus l'efficacité de l'utilisation d'images satellitaires multi-dates issues de plusieurs capteurs par des techniques de photo-interprétation, et de classification semi automatiques. Cette fois-ci appliquées sur le Gabon pour une classification non pas binaire comme la carte du couvert forestier (Fichet et al, 2013) mais discriminant une dizaine de classes, cette méthode combinant la photo-interprétation et classification semi-automatiques permet au pays de disposer désormais d'une carte de l'occupation du sol pour les années de référence 2015 et 2010. La précision issue de l'analyse de la matrice de confusion estimée à 95% conforte davantage sur la qualité du travail accompli. Cependant des limites demeurent notamment dans la discrimination de certaines classes avec des réponses spectrales semblables pouvant entraîner un certain nombre de confusion dans l'interprétation des images. Les forêts inondées et les prairies aquatiques par exemple, ayant une rétrodiffusion similaire sur les images Radar ne sont pas faciles à distinguer par photo interprétation quand bien même la texture des forêts

inondées apparaît un peu plus rugueuse que les prairies aquatiques. De plus, l'utilisation de la méthode de collecte de donnée allant sur plus ou moins 2 ans par rapport à l'année de référence peut également biaiser la détection de changement entre deux dates. En perspectives, l'utilisation de données RADAR en bande L sur toute la classification avec en complément des images optiques de haute ou très haute résolution pourrait régler le problème du couvert nuageux quasi permanent dans l'année et limiter ainsi l'année de référence à un an plutôt qu'à plus ou moins 2 ans.

Références

- De Wasseige, C., de Marcken, P., Bayol, N., Hiol Hiol, F., Ph. Mayaux, Desclée, B., et al. (2012). *Les forêts du bassin du Congo - Etat des Forêts 2010*, Office des publications de l'Union Européenne, Luxembourg 978-92-79-22717-2 (276 pp.).
- Direction Générale de la Statistique. (2015). *"Résultats globaux du Recensement Général de la Population et des Logements de 2013 du Gabon (RGPL-2013)." Libreville, Publication de la Direction Générale de la Statistique (DGS).*
- FAO. 2005. AQUASTAT Profil de Pays - Gabon. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie.
- Fichet L. V., Sannier C., Makaga E. M. K., & Seyler F. (2013). *Assessing the accuracy of forest cover map for 1990, 2000 and 2010 at national scale in Gabon*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 7, n°4, pp. 1346-1356.
- Frison P. L., Lardeux C., Fruneau B., & Rudant J. P. (2019). Polarimétrie radar complète et partielle pour le suivi des surfaces terrestres. *Revue Française de*

Photogrammétrie et de Télédétection, n°219-220, pp. 33-39.

Hudson W. D. (1987). Correct formulation of the kappa coefficient of agreement. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, vol. 53, n° 4, pp. 421-422.

Makanga J. M. (2011). Mosaïque forêt-savane et exploitation des ressources forestières du Gabon. *Geo-Eco-Trop*, vol. 53, n° 4, pp. 421-422.

Maloba-Makanga J. D., Samba G. (1997). Organisation pluviométrique de l'espace Congo-Gabon (1951-1990). *Sécheresse (Montrouge)*, vol. 8, n° 1, pp. 39-45.

Michez A. (2006). Etude de la population d'hippopotames (*Hippopotamus amphibius* L.) de la rivière Mouena Moue au Parc National du Loango-Sud (Gabon) (Doctoral dissertation, Université de Liège, Liège, Belgique).

Miyono J. A. J. A., Makak J. S., Palla F., & Trebossen H. F. (2019). Images satellites pour l'évaluation de l'occupation du sol dans les sites de gestion au Gabon.

Olofsson P., Foody G. M., Herold M., Stehman S. V., Woodcock C. E., Wulder M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, vol. 148, pp. 42-57.

Richards J. A., Woodgate P. W., & Skidmore A. K. (1987). An explanation of enhanced radar backscattering from flooded forests. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, n°7, pp. 1093-1100.

Sannier C., McRoberts R. E., Fichet L. V., & Makaga E. M. K. (2013). Using the regression estimator with Landsat data to estimate proportion forest cover and net proportion deforestation in Gabon. *Remote Sensing of Environment*, vol. 151, pp. 138-148.

Sannier C., McRoberts R. E., & Fichet L. V. (2016). Suitability of Global Forest Change data to report forest cover estimates at national level in Gabon. *Remote Sensing of Environment*, vol. 173, pp. 326-338.

UNFCCC. (2006) Decision 16/CMP.1 <http://unfccc.int/resource/docs/2005/cmp1/eng/08a03.pdf> accessed on 26 February 2015

Wang Y., Hess L. L., Filoso S., & Melack J. M. (1995). Understanding the radar backscattering from flooded and nonflooded Amazonian forests: Results from canopy backscatter modeling. *Remote Sensing of Environment*, vol. 54, no 3, pp. 324-332.

Titre et légendes des figures en anglais:

Land use mapping in Gabon year 2015; Changes between 2010 and 2015

Figure 1: Area of interest.

Figure 2: Spot 6/7 pivot 2015 images.

Figure 3: Sentinel 2 pivot 2015 images.

Figure 4: ALOS 1 Radar Images.

Figure 5: Itineraries of the field campaigns.

Figure 6: Spot 4 (left) and Aster (right) images for 2010 reference year

Figure 7: Cloud masks on a Sentinel 2 Image. Unmasked image (top) and masked image (bottom). Scene "33 MUU" (Franceville, Poubara) (Lat. 1 ° 30'11.03 "S, Lon. 13 ° 27'37.16" E)

Figure 8: Data coverage for 2015 reference year.

Figure 9: Data coverage for 2010 reference year.

Figure 10: Data coverage for 2010 reference year.

Figure 11: Semi-automatic classification example before manual improvement. "Forest" (Top) and "Non-Forest" (bottom) classes. (scene 32 NNF Sentinel 2, Lat. 0 ° 24'10.51 "N, Lon. 9 ° 32 '16 .13 "E).

Figure 12: Poubara region before manual improvement of land cover classes

Figure 13: Poubara region after manual improvement of land cover classes

Figure 14: Aerial photo of Sucaf sugar cane culture useful for manual improvement of land cover classes (Image SPOT6 / 7, Lat. 1 ° 43'51.19 "S, 13 ° 24'13.77" E, 10-04-2016)

Figure 15: Aerial photo of mangroves taken on Port-Gentil-Omboué road (SPOT6 / 7 image, Lat. 1 ° 6'15.98 "S, 8 ° 58'19.78" E, 06-27-2015)

Figure 16: Flooded forests and aquatic meadows Identification by thresholding the HH band of ALOS 1 Radar images and DEM

Figure 17: Comparison between flooded forests on ASTER image and on ALOS 1 RADAR image in HH polarization.

Figure 18: Landcover Map of Gabon in 2015

Figure 19: Landcover Map of Gabon in 2010

Figure 20 : Landcover changes of Gabon between 2010 and 2015

Table 1: Landcover classes statistics in 2015

Table 2: Landcover classes statistics in 2010

Table 3: confusion matrix