

Détection automatique et cartographie des champs de cacaoyers sous-ombrage en zone forestière tropicale à l'aide d'images Landsat dans la Province de l'Ituri en République Démocratique du Congo

Jean-Paul Kibambe Lubamba*, Pacifique Madibi Mubamba

Université de Kinshasa. Faculté des Sciences Agronomiques. BP 117 Kinshasa XI (RDC). E-mail : jpkibambe@gmail.com

Reçu le 15 janvier 2022, accepté le 19 février 2022, publié en ligne le 11 mars 2022

RESUME

Description du sujet. La discrimination des cultures pérennes par télédétection est un défi du fait de la difficulté d'en singulariser la signature spectrale par rapport à l'environnement immédiat. Cette difficulté est accrue lorsque lesdites cultures se trouvent en zone forestière où le signal de la canopée environnante contribue de manière prépondérante dans la réflectance de la zone d'intérêt.

Objectif. L'étude vise à explorer le potentiel des images Landsat pour discriminer les champs de cacaoyers sous ombrage en zone forestière prédominante dans la Province de l'Ituri en République Démocratique du Congo.

Méthodes. La méthodologie mise en place a permis de développer un algorithme intégrant un processus itératif de modélisation à même d'isoler autant que possible la signature spectrale des champs de cacaoyers. La calibration et la validation ultérieure du modèle de détection se sont basées sur les données collectées durant la mise en œuvre du Projet Pilote REDD+ Intégré de Mambasa entre 2009 et 2015, ainsi que lors d'une campagne de terrain conduite en mai 2018.

Résultats. Considérant la période 2000-2015 ainsi que les tranches d'âges des champs de cacaoyers de 0-3 ans, 4-7 ans et > 7 ans, les résultats de l'étude ont montré que la répartition desdits champs n'était pas homogène selon les tranches d'âges et en fonction des années d'intérêt, rendant ainsi plus complexe leur détection sur les images Landsat. La performance du modèle de détection a été évaluée à 38 %, quelle que soit la tranche d'âge, ce qui constitue un résultat intéressant au regard de la résolution spatiale des images Landsat (dont la superficie du pixel est de ~ 0,09 ha) en comparaison avec la taille moyenne des champs de cacaoyers de l'ordre de $1,29 \pm 0,77$ ha.

Conclusion. Les résultats de la recherche indiquent que le recours à des images à haute, voire très haute résolution spatiale, peut permettre d'étendre la portée de cette étude et augmenter significativement la capacité de détection du modèle développé.

Mots-clés : Champs de cacaoyers, agroforesterie, télédétection optique, modélisation, Ituri/RDC

ABSTRACT

Title: Automatic detection and mapping of cocoa shade grown fields within tropical forests areas using Landsat images in the Ituri Province of the Democratic Republic of Congo

Description of the subject. Discrimination of perennial crops using remote sensing techniques is challenging due to the difficulty of singling out their spectral signature from the immediate environment. This difficulty is increased when the said crops are in forest areas where the signal from the surrounding canopy will contribute in a preponderant way to the area of interest reflectance.

Objective. The study aims at exploring the potential of Landsat images to discriminate cocoa shade grown fields in the predominantly forested area of Ituri Province in the Democratic Republic of Congo.

Methods. The methodology used allowed the development of an algorithm integrating an iterative modeling process for isolating as much as possible the spectral signature of cocoa fields. The calibration and subsequent validation of the detection model was based on data collected during the implementation of the Mambasa Integrated REDD+ Pilot Project between 2009 and 2015, as well as during a field campaign conducted in May 2018.

Results. Considering the period 2000-2015 as well as the age ranges of cocoa fields 0-3 years, 4-7 years and > 7 years, the results of the study showed that the distribution of these fields was not homogeneous according to the

age ranges and years of interest, thus making their detection on Landsat images more complex. The detection model performance was evaluated at 38%, regardless of the age ranges, which is an interesting result given the spatial resolution of Landsat images (whose pixel area is ~ 0.09 ha) in comparison with the average size of cocoa fields of about 1.29 ± 0.77 ha.

Conclusion. Results of the research imply that the use of high or even very high spatial resolution images can extend the scope of this study and significantly increase the detection capacity of the model developed.

Keywords: Cocoa field crops, agroforestry, optical remote sensing, modeling, Ituri/DRC.

1. INTRODUCTION

Le Bassin du Congo abrite 90 % de la forêt tropicale africaine et contribue à la moitié de la déforestation annuelle du continent (Mayaux *et al.*, 2013). Cependant, le taux annuel de déforestation dans le bassin du Congo est respectivement trois fois et neuf fois plus faible que celui de l'Afrique de l'Ouest et de Madagascar, qui sont les deux autres principales régions de forêts tropicales en Afrique (Bérenger *et al.*, 2015). La République Démocratique du Congo (RDC) abrite quant à elle 60 % de la surface totale des forêts du Bassin du Congo (Megevand, 2013), mais dont la perte de couverture forestière n'a cessé d'augmenter au long des deux dernières décennies. En effet, le taux de déforestation annuel y est passé de 0,44 % (pour la période de 2000 à 2010) à 1,25 % (pour la période de 2010 à 2014) et dont les causes principales sont l'agriculture itinérante sur brûlis et la demande croissante en bois énergie (NERF, 2018).

En vue de freiner la perte de couverture forestière dans les pays tropicaux, de nombreuses initiatives, telles que la Réduction des Emissions dues à la Déforestation et à la Dégradation des forêts tropicales (REDD+), ont vu le jour et reçu l'assentiment de la communauté internationale. En particulier, la RDC a adhéré à l'initiative REDD+ en 2012, avec une stratégie-cadre nationale qui détaille les causes directes et sous-jacentes de la déforestation au niveau national, ainsi que les axes d'intervention pour stabiliser la couverture forestière du pays à 67,5 % du territoire national à l'horizon 2035 (NERF, 2018). Parmi ses axes d'intervention, la RDC a entrepris, à l'instar de nombreux autres pays tropicaux (Michel *et al.*, 2019 ; Ngo-Bieng *et al.*, 2019 ; Saj *et al.*, 2019 ; Sanogo *et al.*, 2019 ; Carimentrand, 2020), les possibilités d'explorer le potentiel de l'agroforesterie en y incluant la culture de cacaoyers sous ombrage, pour la réduction de la déforestation et de la dégradation des forêts.

Le Projet Pilote REDD+ Intégré de Mambasa (PIREDD Mambasa) mis en œuvre de 2009 à 2015 fait partie des alternatives innovantes pour réduire l'emprise des moteurs directs et sous-jacents de la déforestation et de la dégradation forestière dans la Province de l'Ituri, à l'extrême nord-est de la RDC. Le projet ciblait la zone autour de Mambasa où le

taux de déforestation était évalué à 0,4 % (Leal, 2019), et a consisté principalement à inciter la population paysanne à opter pour l'agroforesterie et particulièrement la culture du cacaoyer sous ombrage en forêt secondaire ou dans les jachères pour ralentir la perte des forêts primaires, maintenir un couvert arboré dense tout en garantissant une source alternative et crédible de revenus pour les populations.

L'évaluation de l'efficacité de la cacao-culture sous ombrage pour freiner le rythme de la perte de couverture forestière nécessite qu'il soit possible de discriminer les étendues cacaoyères dans leur environnement forestier, en vue d'évaluer le comportement de l'ensemble du couvert arboré dans un massif donné. Cependant, les méthodes de suivi des forêts par télédétection, aujourd'hui opérationnelles et automatisées avec des chaînes de traitement validées par de nombreuses publications scientifiques (Masse, 2013 ; Stratoulas *et al.*, 2017 ; Dehecq *et al.*, 2020 ; Dilek et Uğur, 2020 ; Munawar *et al.*, 2021 ; Wan *et al.*, 2021), n'intègrent généralement pas le suivi spécifique des espèces cultivées sous ombrage, lesquelles contribuent à maintenir un couvert arboré en zone forestière dominante. En effet, le défi est d'isoler une signature spectrale indicatrice permettant d'identifier des champs d'une espèce donnée à partir de l'analyse des images satellites (Fournier, 2011 ; Kpangui, 2018 ; Hunt *et al.*, 2020 ; Sheikh and Mohammad, 2020 ; Yu *et al.*, 2020 ; Ouattara *et al.*, 2021).

A titre d'exemple, Hunt *et al.* (2020) signalent notamment que la petite taille des parcelles dans les plantations de caféiers, l'évolution de la signature spectrale du caféier au gré de l'âge de la plantation, et la confusion de la signature spectrale du caféier avec celles d'autres végétations (forêt et/ou pâturage) sont autant de contraintes pour la cartographie des champs de caféiers au moyen de la télédétection. Numbisi *et al.* (2019) ont par ailleurs indiqué que la délimitation par télédétection optique des champs de cacaoyers en agroforesterie était rendue difficile par la similarité des signatures spectrales de leurs canopées avec celles des forêts environnantes ainsi que la persistance des nuages en milieu tropical.

L'étude vise à explorer le potentiel des images Landsat pour discriminer les champs de cacaoyers

sous ombrage en zone forestière prédominante dans la Province de l'Ituri en République Démocratique du Congo. L'intérêt de cette étude se situe dans le développement d'un modèle itératif permettant d'isoler autant que possible la signature spectrale des champs de cacaoyers sous ombrage sur des images satellites Landsat, dont la résolution spatiale et la présence fréquente des nuages en milieu tropical ont toujours constitué une difficulté pour la détection automatique et la cartographie desdits champs.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Milieu d'étude

La zone d'étude est localisée dans la forêt équatoriale de l'Ituri au nord-est de la RDC. Les champs de cacaoyers répertoriés dans le cadre de cette recherche ont fait l'objet d'un monitoring spécifique durant la mise en œuvre du projet PIREDD Mambasa et sont situés dans le territoire de Mambasa le long de la Route Nationale 4 (RN4), ainsi qu'au sud de la cité de Mambasa sur l'axe reliant cette dernière à la ville de Beni (Figure 1). Les forêts de l'Ituri sont situées à une altitude moyenne de 600 m, avec un dénivelé de l'ordre de 1 500 m dans la zone de transition avec les savanes

anthropiques et les forêts de montagne. La température moyenne annuelle est de 31 °C avec une humidité moyenne de 85 %. Environ 20 % de la forêt de l'Ituri est comprise dans la Réserve de Faune à Okapis, inscrite sur la liste des sites du patrimoine mondial de l'UNESCO.

Les forêts de l'Ituri sont soumises à des fortes pressions dues à l'agriculture itinérante sur brûlis, à l'exploitation abusive du bois et aux activités minières. En absence de toute action de gestion durable des forêts, le taux de déforestation ainsi que les émissions de gaz à effet de serre devraient augmenter considérablement, étant corrélées à l'augmentation de la population du fait essentiellement de l'immigration en provenance du Nord-Kivu à la recherche d'étendues de terres agricoles disponibles. Dans ce contexte, le projet PIREDD Mambasa visait à créer des conditions viables pour une intensification agricole durable dans le but de lutter contre la dégradation des forêts. Le double défi de ce projet était ainsi le développement rapide de l'économie locale afin de réduire la faim et limiter les impacts négatifs des activités humaines sur la forêt.

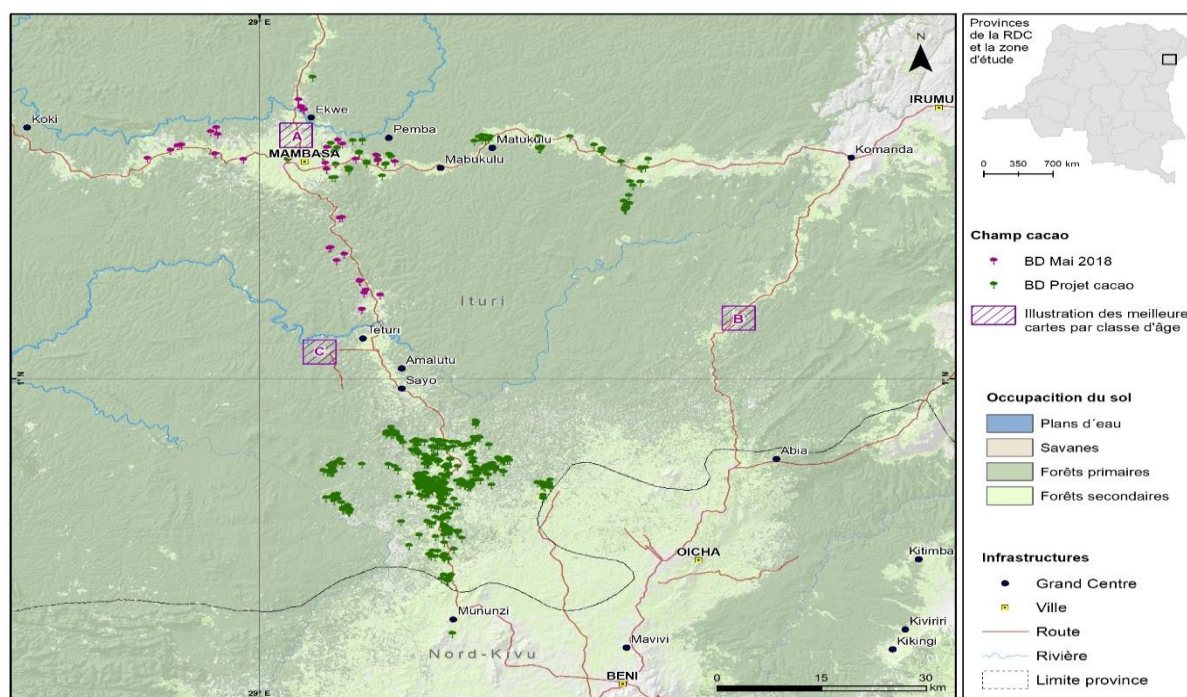


Figure 1. Milieu d'étude

2.2. Méthodes

Collecte des données

Les données utilisées dans cette étude proviennent à la fois de celles collectées durant la mise en œuvre du projet PIREDD Mambasa, celles issues de l'enquête du terrain conduite en mai 2018, ainsi que des images satellites et de leurs produits dérivés.

Base de données PIREDD Mambasa

Dans le cadre du PIREDD Mambasa, près de 4 000 champs localisés dans la zone d'étude ont été enregistrés dans deux bases de données. Pour la présente étude, ces données ont été analysées pour compiler une base de données unique et harmonisée (BD Projet Cacao – Figure 2). La compilation a été rendue possible sur base des critères de sélection des champs de cacaoyers pour lesquels les informations suivantes ont été recensées : (1) l'année d'installation des champs, (2) la superficie déclarée des champs, (3) les coordonnées géographiques d'un point localisant chaque champ, et (4) le type d'occupation du sol avant l'installation du champ de cacaoyers.

Données de la campagne de terrain de mai 2018

Dans le but de cartographier certaines plantations de cacaoyers en utilisant la technologie GPS, une enquête de terrain a été conduite du 1^{er} au 31 Mai 2018 dans la zone d'étude (BD Mai 2018 – Figure 2). En plus des quatre critères de sélection des champs de cacaoyers mentionnés au point précédent, des informations sur la géométrie et la description de chaque champ ont été collectées lors de la campagne de terrain, notamment dans le but de procéder à la validation de la classification automatique des images satellites Landsat pour la détection des champs de cacaoyers.

Images satellites et produits dérivés

Les images satellites utilisées dans le cadre de cette étude sont de deux types : des images Landsat à ~30 m de résolution spatiale et des images à très haute résolution spatiale (< 10 m) recensées dans la bibliothèque Google Earth. Les outils de traitement des images satellites disponibles sur la plateforme Google Earth Engine (GEE) ont permis de produire des mosaïques annuelles Landsat en utilisant trois bandes spectrales : Proche infrarouge, Rouge et Vert. Les composites ont été produits sans nuages à intervalles réguliers de 5 ans, de 2000 à 2015.

Cependant, dans le sud-ouest de la zone d'étude, la bibliothèque d'images Landsat compilée pour la production de mosaïques était contaminée par la présence d'images dites *SLC-off* qui présentent des rayures du fait d'une anomalie sur le correcteur du scanner par ligne au niveau du satellite Landsat 7. Par ailleurs, les images à très haute résolution spatiale de la bibliothèque Google Earth ont été explorées pour l'identification de certains champs de cacaoyers par reconnaissance visuelle.

Enfin, la carte FACET (Forêts d'Afrique Centrale Évaluées par Télédétection) dérivée de l'analyse d'images Landsat (FACET, 2012) a aussi été utilisée car elle présente les classes de forêt primaire, forêt secondaire et savanes arborées à l'échelle de la RDC. Ces classes ont été utilisées pour comparer les déclarations des agriculteurs concernant le type d'occupation du sol avant l'installation de leurs champs et pour entraîner le modèle de classification à reconnaître ces dernières sur les composites Landsat dans le cadre de la modélisation mise en œuvre pour la présente recherche.

Structure du modèle de détection

Le modèle développé dans le cadre de cette étude comprend trois grandes composantes que sont la réorganisation de la base de données des champs de cacaoyers en classes d'âges d'intérêt (0-3 ans, 4-7 ans et plus de 7 ans), la classification des mosaïques temporelles Landsat pour les années 2000, 2005, 2010 et 2015 afin de dériver les classes majeures d'occupation du sol ; et l'évaluation de la précision de la classification des images Landsat pour discriminer les champs de cacaoyers par tranches d'âges. Cette méthodologie a été déclinée en cinq étapes opérationnelles pour chacune des itérations de la modélisation de la signature spectrale des champs de cacaoyers. La Figure 2 ci-dessous présente le schéma méthodologique détaillé de ces cinq étapes.

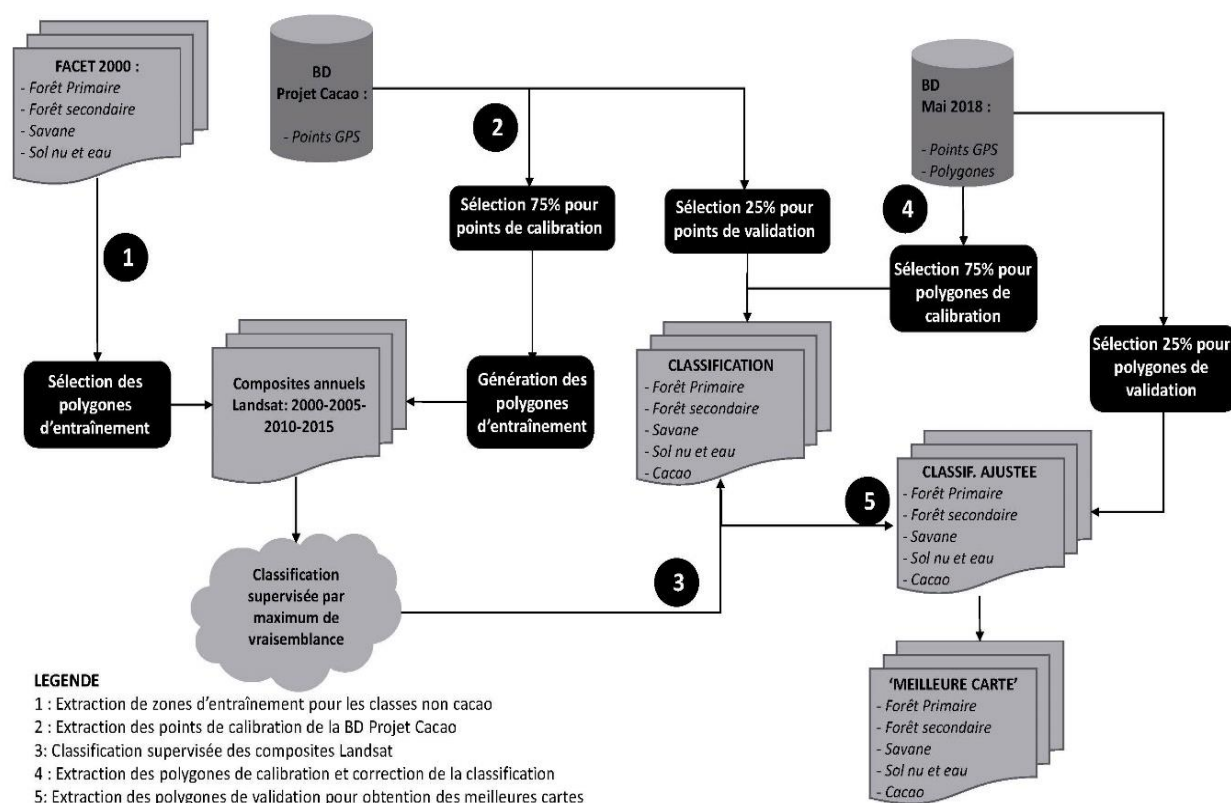


Figure 2. Schéma méthodologique pour une itération du processus de modélisation

Architecture de la base de données

Les enregistrements de la BD Projet Cacao (Figure 2) ont été regroupés en trois classes d'âge (0-3 ans ; 4-7 ans ; et plus de 7 ans) selon l'année d'intérêt (2000, 2005, 2010 et 2015). Ces tranches d'âge ont été retenues en rapport avec la phytotechnie du cacaoyer qui présente différentes phases phénologiques durant celles-ci. La période d'âge comprise entre 0 et 3 ans est en général caractérisée par l'apparition des premières fleurs après la

germination. A cet âge, le cacaoyer peut donner des fruits tout au long de l'année selon les conditions climatiques et il atteint par ailleurs son plein rendement entre 5-7 ans après plantation. Tout au long de sa croissance, la tige s'allonge pour atteindre 30 à 40 cm en 4/5 ans, le double après 5/6 ans, et sa taille définitive (> 80 cm) à 10 ans. La base de données réorganisée se présente donc de la manière illustrée dans le Tableau 1 ci-dessous, où n est le nombre de champs.

Tableau 1. Organisation générale de la BD Projet Cacao

Année	Champs de 0 – 3 ans	Champs de 4 – 7 ans	Champs > 7 ans
2000	n_{11} établis entre 1997-2000	n_{12} établis entre 1993-1996	n_{13} établis avant 1993
2005	n_{21} établis entre 2002-2000	n_{22} établis entre 1998-2001	n_{23} établis avant 1998
2010	n_{31} établis entre 2007-2010	n_{32} établis entre 2003-2006	n_{33} établis avant 2003
2015	n_{41} établis entre 2012-2015	n_{42} établis entre 2008-2011	n_{43} établis avant 2008

La BD Mai 2018 (Figure 2) a été structurée selon la même logique que la BD Projet Cacao, avec cependant une information additionnelle qui concerne la délimitation cartographique du contour de chaque champ inventorié.

Classification des composites Landsat par année d'intérêt

Dans un premier temps, les aires d'entraînement pour les classes des Forêt Primaire (FP), Forêt Secondaire (FS), Sol Nu (SN) et Eau (E) ont été générées à partir de la carte FACET, en vue d'entraîner le modèle de

classification à reconnaître automatiquement ces classes sur l'ensemble des composites pour les années 2000, 2005, 2010 et 2015. Les aires d'entraînement pour ces différentes classes ont été délimitées pour chaque année d'intérêt par photo-interprétation sur base d'une composition des bandes spectrales 5-4-3 (Proche Infrarouge – Rouge – Vert), dite infrarouge fausses couleurs, permettant de visualiser les zones forestières en vert, l'eau en bleu et le sol nu en teinte claire. D'autre part, les effets de lignage devant aussi être extraits de l'analyse ont constitué une classe à part.

Pour la détection proprement dite des champs de cacaoyers, une première étape a consisté à sélectionner aléatoirement 75 % de champs par classe d'âge et par année d'intérêt, constituant des données de calibration en vue d'entraîner le classificateur. Les 25 % restants ont servi à la validation du résultat de classification, selon un nombre d'itérations bien déterminé. Le Tableau 2 présente la structure des données de validation et de calibration pour chaque année d'intérêt et par tranche d'âge, où n représente le nombre de champs.

Tableau 2. Organisation de la base de données par itération du modèle de détection

Année	0 – 3 ans		4 – 7 ans		> 7 ans	
	Calibration	Validation	Calibration	Validation	Calibration	Validation
2000	75 % x n_{11}	25 % x n_{11}	75 % x n_{12}	25 % x n_{12}	75 % x n_{13}	25 % x n_{13}
2005	75 % x n_{21}	25 % x n_{21}	75 % x n_{22}	25 % x n_{22}	75 % x n_{23}	25 % x n_{23}
2010	75 % x n_{31}	25 % x n_{31}	75 % x n_{32}	25 % x n_{32}	75 % x n_{33}	25 % x n_{33}
2015	75 % x n_{41}	25 % x n_{41}	75 % x n_{42}	25 % x n_{42}	75 % x n_{43}	25 % x n_{43}

Pour chaque itération du modèle de classification et d'évaluation de la précision, l'emprise spatiale des champs contenus dans la BD Projet Cacao a été simulée étant donné que cette information était inexistante à l'origine. Celle-ci a été approximée par génération automatique et aléatoire des polygones de forme carrée et centrés sur les coordonnées géographiques répertoriées pour chaque champ, et dont la superficie correspond à celle recensée dans la base de données. Les données de calibration ont permis de récapituler les valeurs des bandes spectrales par tranche d'âge et par période d'intérêt pour chaque champ. Cette signature des champs de cacaoyers a été par la suite associée à celle des 4 autres classes (FP, FS, SN, et E) par période d'intérêt.

Une fois les zones d'entraînement des cinq classes (FP, FS, SN, E et C : Cacao) constituées, le modèle de classification est lancé par classe et année d'intérêt sur les composites Landsat. La classification supervisée a été préférée étant donnée la connaissance a priori des classes devant être retenues, c'est-à-dire Forêt Primaire (FP), Forêt Secondaire (FS), Sol Nu (SN), Eau (E) et C (Cacao). Le classificateur utilisé est l'algorithme de classification par maximum de vraisemblance (*Maximum Likelihood Classifier* - MLC). Le résultat obtenu à chaque itération produit les cartes d'occupation du sol suivantes : une carte pour l'année 2000 avec la détection des champs de 0-3 ans, une carte pour l'année 2000 détectant les champs de 4-7 ans, une carte pour l'année 2000 détectant les champs d'âge supérieur à 7 ans, une carte pour l'année 2005 détectant les champs de 0-3 ans, etc. jusqu'à une carte de l'année 2015 détectant les champs d'âge supérieur à 7 ans. Le modèle développé permet ainsi de générer des centaines (selon le nombre d'itérations retenu pour le modèle) de cartes équiprobables de détection des champs de cacaoyers dont la précision est évaluée à l'aide premièrement des données de validation de la BD Projet Cacao.

Analyse de la précision des classifications

Les cartes produites à l'issue de l'étape de classification et ayant le niveau de détection le plus élevé par comparaison aux données de validation de la BD Projet Cacao ont été par la suite confrontées aux informations de la BD Mai 2018. Elles ont été recalibrées et donc corrigées pour ensuite être validées avec 25 % des données de la BD Mai 2018 non inclus dans la procédure de correction des classifications. Les cartes corrigées présentant le pourcentage le plus élevé de détection des champs de cacaoyers en comparaison avec les données de validation de la BD Mai 2018 ont été retenues comme étant les meilleures cartes de détection des champs de cacaoyers. La capacité de détection a été évaluée en rapportant la superficie des polygones de validation qui intersecte les pixels classés cacao, à la superficie totale des polygones de validation.

3. RÉSULTATS

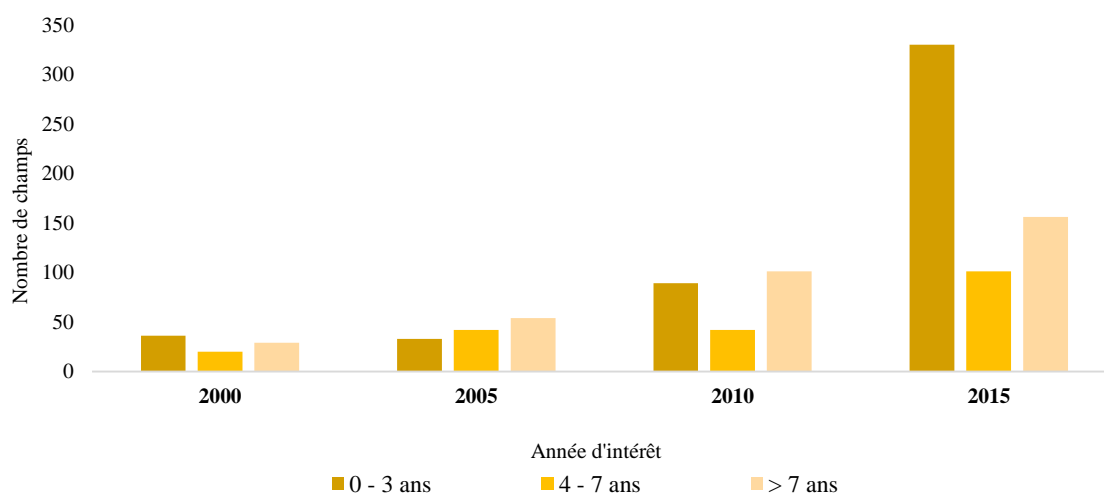
3.1. Répartition des champs de cacaoyers par tranche d'âge et par type d'occupation du sol

Sur un total de 4 000 champs dans la BD Projet Cacao, seuls 587 champs (environ 15 %) ont été retenus et encodés avec toutes les caractéristiques requises pour permettre la présente analyse. Ces 587 champs ont été organisés selon les tranches d'âges identifiées (voir Tableau 3) et couvrent une superficie totale de près de 760 ha, soit une taille moyenne de l'ordre $1,29 \pm 0,77$ ha par champ.

Tableau 3. Nombre de champs par tranche d'âge et superficie dans la base de données harmonisée

Années	0 – 3 ans		4 – 7 ans		> 7 ans	
	Nombre	Superficie (ha)	Nombre	Superficie (ha)	Nombre	Superficie (ha)
2000	36	52	20	25,1	29	44,2
2005	30	40,5	42	54,9	54	77,9
2010	89	116,8	42	53,1	101	138,8
2015	330	418,4	101	130,2	156	207,9

La Figure 3 ci-dessous présente la distribution du nombre des champs par tranche d'âge. Celle-ci indique notamment une lente augmentation de nouveaux champs (0-3 ans) entre 2007-2010 et une croissance exponentielle entre 2012-2015.

**Figure 3.** Distribution des champs par tranche d'âge

Concernant le type d'occupation du sol avant l'installation des champs de cacaoyers, les enquêtes réalisées dans le cadre du Projet Cacao auprès des agriculteurs indiquent que pour les 36 champs installés entre 1997 et 2000, 8,33 % de champs (3 champs pour 3 ha) ont été installés en forêt primaire, 19,44 % (7 champs pour 8,5 ha) en forêt secondaire et 72,22 % (26 champs pour 40,5 ha) sur des jachères. Pour les 30 champs installés entre 2000 et 2002, 1 champ de 1 ha a été installé en forêt primaire (soit 3,03 %), 21,21 % (7 champs pour 8 ha) de champs en forêt secondaire et 66,67 % (22 champs pour 31,5 ha) dans les jachères. Sur les 89 champs installés entre 2007 et 2010, 6,74 % (6 champs – 10 ha) ont été installés en forêt primaire, 37,08 % (33 champs – 45 ha) ont été installés en forêt secondaire et 56,18 % (50 champs – 61,8 ha) ont été installés dans les jachères. Enfin, sur les 330 champs installés entre 2012 et 2015, 7,88 % (26 champs – 34,98 ha) ont été installés en forêt primaire, 33,03 % (109 champs – 142,23 ha) ont été installés en forêt secondaire et 59,09 % (195 champs – 241,2 ha) ont été installés dans les jachères.

Ainsi, pour les champs ayant entre 0-3 ans pour l'ensemble des années d'intérêt, 48,98 ha ont été installés en forêt primaire (soit 7,80 % de la superficie totale emblavée), 203,73 ha en forêt secondaire (32,46 %) et 375 ha (59,74 %) dans les jachères. Ces déclarations des agriculteurs recensées dans la base de données indiquent ainsi que la majorité des champs (soit un peu plus de 90 % en superficie emblavée durant les années d'intérêt) a été installée selon les exigences du Projet, c'est-à-dire, en forêt secondaire ou dans les jachères.

La comparaison de ces déclarations avec les cartes d'occupation du sol du produit FACET indique que sur les 627,71 ha emblavés durant les années d'intérêt, 37,54 % (235,68 ha) l'ont été en forêt primaire, 25,67 % (161,15 ha) en forêt secondaire, 20,27 % (127,28 ha) dans les savanes arborées et 16,50 % (103,6 ha) au sein des zones non forestières.

Pour les 37 champs recensés durant la campagne de terrain de 2018 dont la superficie totale est de 57,01 ha, 21,96 ha (38,51 % de la superficie totale des 37 champs) ont été emblavés en forêt primaire, 21,76 ha (38,16 %) en forêt secondaire et 13,29 ha (23,31 %) dans les jachères. L'analyse sur base des cartes FACET indique cependant que 58,44 % ont été préparés en forêt primaire, 34,76 % en forêt secondaire, 4,54 % dans les savanes arborées et 2,26 % dans les zones non forestières.

3.2. Détection des champs de cacaoyers et évaluation de la précision du modèle de détection

Un total de 600 cartes potentielles a été produit après 15 itérations de la modélisation, reprenant les classes de Forêt Primaire, Forêt Secondaire, Sol nu, Eau et Cacao. Les cartes présentant la meilleure précision de détection de la classe Cacao par tranche d'âge ont été retenues et il s'est avéré que toutes étaient relatives à l'année 2010. La précision de détection a été de 91 % pour la tranche d'âge de 0-3 ans, 84 % pour la tranche d'âge de 4-7 ans et 75 % pour la dernière tranche d'âge. L'illustration de ces trois meilleures cartes est présentée à la Figure 4.

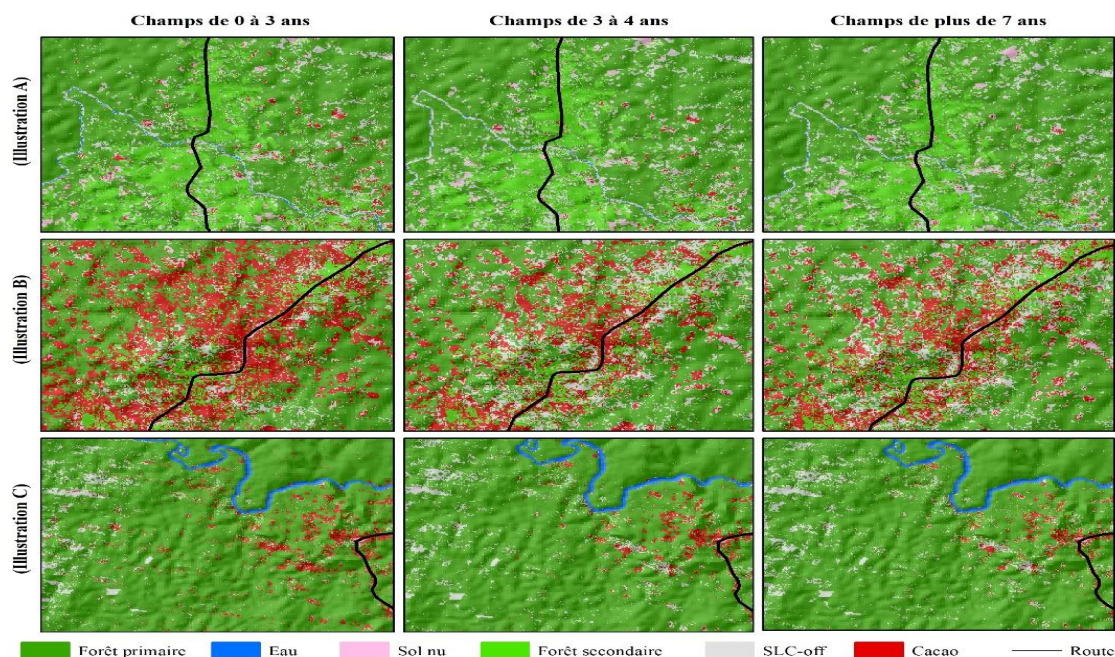


Figure 4. Détection des champs de cacaoyers par classe d'âge

L'enquête de terrain conduite en mai 2018 a permis d'identifier et de cartographier trente-sept champs qui ont été organisés en tranches d'âge. La précision du modèle de détection sur base de la BD Mai 2018 est présentée dans le Tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4. Evaluation de la précision du modèle de détection

Tranche d'âge	Superficie terrain (ha)	Superficie carte détection (ha)	Précision de détection du modèle (%)
Tranche 0 à 3 ans	56,9	27,4	48
Tranche 4 à 7 ans	56,9	18,3	33
Tranche > 7ans	56,9	18	32

En comparaison avec les données cartographiées sur le terrain, la capacité de détection des champs de cacaoyers à partir des meilleures cartes et par tranche d'âge est de 38 % en moyenne. Ce pourcentage de détection semble satisfaisant au regard de la taille de champs ($1,29 \text{ ha} \pm 0,77 \text{ ha}$) de la campagne de Mai 2018 et de la résolution spatiale des images Landsat (~30 m).

4. DISCUSSION

A l'issue de la constitution de la base de données harmonisée pour la présente étude, il a été observé que la tendance de la répartition des champs de cacaoyers selon les tranches d'âge et les années d'intérêt est atypique. En effet, pour l'année 2000, les champs de cacaoyers de 0-3 ans sont évalués à près de 40 % (soit une superficie de l'ordre de 52 ha), 24 % (soit une superficie équivalente à près de 25 ha) pour ceux de l'âge intermédiaire entre 4 et 7 ans et près de 35 % (pour une superficie équivalente à près de 44 ha) pour ceux de plus de 7 ans.

Pour l'année 2005, les champs de cacaoyers pour la tranche d'âge de 0-3 ans ne représentent que près de 25 % (soit une superficie de 43 ha environ), ce qui indique qu'il y a eu moins de superficie emblavée de cacaoyers durant l'année 2002-2005 par rapport à la période 1997-2000. On observe par ailleurs une très légère augmentation de champs de plus de 7 ans (pour un total de 55 ha) par rapport à l'année 2000, car ces derniers incluent certains des champs plantés entre 1998 et 2000 comptabilisés ainsi dans la tranche d'âge de 0-3 ans pour l'année 2000. Une augmentation des champs de plus de 7 ans a été observée et serait justifiée tout autant de la même manière.

Pour l'année 2010, il y a eu une importante hausse de champs de cacaoyers pour la tranche d'âge de 0-3 ans, représentant une superficie de près de 40 % de l'ensemble de champs répertoriés, soit près de 117 ha. Il s'agit ici de nouveaux champs ouverts entre 2007-2010. Concernant ceux de 4-7 ans, il s'agit essentiellement de champs ayant 0-3 ans en 2000, auxquels se sont ajoutés ceux plantés entre 2005-2006, soit environ 27,5 ha non inclus dans les champs plantés entre 2002-2003 (soit près de 56 ha).

Enfin, pour l'année 2015, plus de la moitié (56,25 %) des champs répertoriés sont ceux dont l'âge est compris entre 0-3 ans et occupant une superficie de près de 420 ha. Il s'agit ici de nouveaux champs plantés entre 2012 et 2015. Les champs d'âge entre 4 et 7 ans sont ceux ayant entre 0-3 ans en 2010, auxquels se sont ajoutés ceux installés entre 2010 et 2011 (soit environ 81 ha), sans compter les champs mis en culture entre 2007 et 2008, soit un total de 50 ha.

Ces observations montrent en définitive une hausse de nouveaux champs ouverts entre 1997-2000 (pour un total de près de 52 ha), selon les estimations issues de la base de données harmonisée pour la présente étude. Ces différentes statistiques indiquent aussi qu'il existe un certain décalage entre les déclarations des paysans et les observations par imagerie satellite. Ces différences peuvent être dues à des erreurs d'interprétation des

images satellites étant donné la faible superficie des champs notamment. Une étude plus fine sur les écarts entre ces déclarations et les observations par imagerie satellite est donc nécessaire en vue de compléter ces conclusions préliminaires.

La capacité de détection du modèle de classification est fortement influencée par la signature spectrale des champs de cacaoyers, dont la dérivation dans le cadre de cette étude est tributaire de : (1) la production automatique et aléatoire de polygones d'entraînement sur base des informations contenues dans la BD Projet Cacao, et (2) la qualité des polygones d'entraînement délimités visuellement sur les images Landsat. Cette reconnaissance visuelle sur les images Landsat est donc un facteur clé dans cette recherche. Il a à cet effet été observé une certaine confusion entre les classes cacao et forêt secondaire, nécessitant une étude plus approfondie sur la signature spectrale spécifique des champs de cacao, en vue d'améliorer la capacité de détection du modèle implémenté. A ce titre, l'exploration de l'apport des indices de végétation pourrait s'avérer très utile pour améliorer les résultats de la présente recherche.

La méthodologie mise en œuvre a permis de produire 600 cartes potentielles reprenant les classes de forêt primaire, forêt secondaire, eau, sol nu et cacao, pour les trois périodes d'intérêt (2000-2005, 2005-2010, et 2010-2015), soit un total de 200 cartes par tranches d'âge des champs de cacaoyers. La précision a été de 91 % pour la tranche d'âge 0-3 ans, 84 % pour la tranche intermédiaire entre 4 et 7 ans et 75 % pour la dernière tranche d'âge sur base des informations contenues dans la BD Projet Cacao. Les données de champs cartographiés sur le terrain en mai 2018 indiquent cependant qu'en moyenne, seulement 38 % de la superficie emblavée peut-être détectée par le modèle développé quel que soit la tranche d'âge de cacaoyer. Il existe donc des différences significatives entre les précisions de détection ressorties des données de modélisation (BD Projet Cacao) et celles estimées à partir des données de terrain (BD Mai 2018). Ces différences renseignent sur la pertinence de l'approche de *modèle assisté (model-assisted)* mise en œuvre dans cette recherche et pour laquelle un jeu de données indépendant (BD Mai 2018) est utilisé pour confronter et améliorer le résultat d'une étape de modélisation précédente (*model-based results*, avec les informations de la BD Cacao). Cette combinaison des deux approches de modélisation est certainement une piste intéressante à explorer pour améliorer la compréhension des résultats de la précision de détection issus d'une modélisation (*model-based results*) uniquement à l'aide des données BD Projet Cacao.

Cette moindre capacité de détection (i.e., 38 %) sur les images Landsat des champs directement cartographiés sur le terrain est liée à la fois à la taille des champs et à la résolution spatiale des images satellites. En effet, étant donné que la taille moyenne des champs est de l'ordre de $1,29 \pm 0,77$ ha, ces derniers ne sont pas facilement détectables sur des images Landsat dont la résolution spatiale est de ~ 30 m x 30 m, soit donc une superficie d'environ 0,09 ha. Avec cette résolution spatiale, un champ moyen n'est donc représenté que par environ 15 pixels, tandis qu'il est généralement recommandé (Davis *et al.*, 1978 ; Mahour et Abkar, 2012) que le nombre de pixels par polygone d'entraînement pour une classification supervisée optimale soit compris entre $10n$ et $100n$; n étant le nombre de bandes spectrales de l'image à classifier. Dans le cadre de cette recherche, le nombre de bandes spectrales utilisé étant de trois, chaque polygone d'entraînement devrait donc contenir entre 30 et 300 pixels, soit 165 pixels en moyenne et donc 10 fois plus que ce qui est observé avec la BD Mai 2018. Ainsi, avec un pourcentage de détection évalué à 38% pour un nombre moyen de pixels équivalent à 15 par polygone d'entraînement, on peut considérer que la capacité de détection du modèle développé serait beaucoup plus élevée avec des polygones d'entraînement contenant entre 30 et 300 pixels, toutes choses restant égales par ailleurs. L'étude menée par Hunt *et al.*, 2020 était par ailleurs aussi butée à cette limitation posée par la résolution spatiale, pour cartographier les champs de caféiers par télédétection au moyen des images Landsat.

Enfin, le modèle itératif développé dans le cadre de cette recherche a permis d'assurer la production de plusieurs cartes potentielles de la répartition des champs de cacaoyers dans la zone d'étude, et les plus plausibles d'entre elles, dites les « meilleures » cartes, ont été sélectionnées en croisant les informations issues des champs directement cartographiés sur le terrain. Ces cartes potentielles fournissent par ailleurs la possibilité d'exploiter des voies alternatives aux difficultés posées par : (1) la résolution spatiale des données d'entrées que sont les images Landsat, (2) la précarité des données cartographiées sur le terrain du fait du coût nécessaire à la réalisation des enquêtes en milieu très reculé, (3) les limites techniques de certaines images Landsat du fait de la présence des nuages ou des zones sans données (images *SLC-off* notamment) ainsi que (4) la contre-vérification des déclarations des agriculteurs. Le recours aux images de résolution spatiale plus fine (<10 m, voire de l'ordre métrique ou sub-métrique) ou des photographies aériennes est évidemment un atout majeur pour étendre la portée de la présente étude.

5. CONCLUSION

La méthodologie mise en place dans le cadre de cette étude a permis de construire une base de données des champs de cacaoyers consolidée et harmonisée avec la phytotechnie de la culture cacaoyère. Le modèle développé pour la détection des champs de cacao a montré qu'il était possible de détecter environ 38 % de ces champs quelle que soit la tranche d'âge considérée, ceci en confrontant directement les données de terrain délimitant les polygones des champs aux données de télédétection. L'étude a montré que le nombre et la délimitation des polygones pour entraîner la classification des images satellites influencent la capacité de détection et le suivi des champs de cacaoyers, et que le recours à des images de résolution spatiale plus fine (< 10 mètres) peut dès lors s'avérer utile pour améliorer les résultats du modèle mis en œuvre. A cet effet, la disponibilité d'images satellites telles que SPOT et Sentinel pourra être très bénéfique pour le type d'analyses développées dans le cadre de cette recherche. Enfin, le modèle itératif développé a ouvert des perspectives de recherche pour pallier aux limitations des images Landsat dans la cartographie des cultures pérennes en milieu forestier tropical dominant.

Références

- Bérenger, Tchatchou. Denis J. Sonwa S.I., Tiani A. M., 2015. *Déforestation et dégradation des forêts dans le Bassin du Congo. 2015. État des lieux, causes actuelles et perspectives*. CIFOR, 60 p.
- Carimentrand A., 2020. *État des lieux sur la déforestation importée et les schémas de certification de l'objectif zéro-déforestation dans la filière cacao*. Rapport d'étude. Comité Scientifique et Technique Forêt/ CIRAD, février 2021. Paris, France, 64 p.
- Davis D., Landgrebe T., Phillips P., Swain R; Hoffer J., Lindenlaub *et al.*, 1978. *Remote sensing: the quantitative approach*. New York, McGraw-Hill International Book Co., 405 p.
- Dehecq A., Gardner A.S., Alexandrov O., McMichael S., Hugonnet R., Shean D. & Marty M., 2020. Automated Processing of Declassified KH-9 Hexagon Satellite Images for Global Elevation Change Analysis Since the 1970s. *Front. Earth Sci.* 8, 566802. doi:10.3389/feart.2020.566802
- Dilek Kucuk Matci & Uğur A., 2020. *Optimization-based automated unsupervised classification method: A novel approach*. Expert Systems with Applications, Volume 160, 113735, ISSN 0957-4174, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113735>
- FACET, 2012. *Forêts d'Afrique centrale Évaluées par télédétection : étendue et perte du couvert forestier en République Démocratique du Congo de 2000 à 2010*. Observatoire Satellital des Forêts d'Afrique Centrale (OSFAC), 2012.

- Fournier A., 2011. *Influence de la structure des couverts végétaux en télédétection de la fluorescence chlorophyllienne*. Instrumentations et Détecteurs [physics.ins-det]. Ecole Polytechnique X.
- Hunt A.D., Tabor K., Hewson J.H., Wood M.A., Reymondin L., Schmitt-Harsh M. & Follett F., 2020. Review of Remote Sensing Methods to Map Coffee: Production Systems. *Remote sensing*, 12 (12), 1-23, <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/12/2041>
- Kpangui K.B., Vroh B.T.A., Kouamé D., Goné B.Z.B., Koffi B.J.C. & Adou Yao C.Y., 2018. Dynamique d'expansion des cacaoyères dans les zones de contact forêt-savane : cas de la sous-préfecture de Kokumbo (Centre de la Côte d'Ivoire). *Tropicicultura*, 36(2), 195-205.
- Leal M., Detoef D. & Kermac M., 2019. *Ituri case study: Promoting cacao to reduce deforestation and alleviate poverty*. WCS, New York, USA.
- Mahour Milad & Abkar Ali, 2012. Evaluation of Model Based Image Analysis of Remotely Sensed Data using Support Vector Machine and Bayes' Theorem. *International Conference of Geomatics*, Tehran, 12 p.
- Masse A., 2013. *Développement et automatisation de méthodes de classification à partir de séries temporelles d'images de télédétection - Application aux changements d'occupation des sols et à l'estimation du bilan carbone*. Océan, Atmosphère. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 190 p.
- Mayaux P., Pekel J-F., Desclée B., Donnay F., Lupi A., Achard F., Clerici M., Bodart C., Nasi R. & Belward A., 2013. *State and evolution of the African rainforests between 1990 and 2010*. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 10 p.
- Megevand C., 2013. *Deforestation Trends in the Congo Basin: Reconciling Economic Growth and Forest Protection*. Washington, DC: World Bank. doi: 10.1596/978-0-8213-9742-8
- Michel I., Carrière S.-M., Manga E.F., Bihina M.A., Blanchet A., Moisy C., Ngono F. & Levang P., 2019. *Les cacaoyères agroforestières au Centre et au Sud du Cameroun : diversité et dynamique*. In *Agroforesterie et services écosystémiques en zone tropicale*. Ed. Quæ Versailles, France, pp. 85-98.
- Munawar H.S., Aggarwal R., Qadir Z., Khan S.I., Kouzani A.Z., Mahmud M.A.P., Gabor A, 2021. Filter-Based Protocol for Automated Image-Based Building Detection. *Buildings*, 11, 302. <https://doi.org/10.3390/buildings11070302>
- NERF, 2018. Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques : Niveau d'Émissions de Référence des Forêts pour la Réduction des Émissions Dues à la Déforestation en République Démocratique du Congo, 178 p. https://redd.unfccc.int/files/2018_frel_submission_drc.pdf
- Ngo-Bieng M.A., Gidoin C. & Ten Hoopen G.M., 2019. *Structures spatiales et régulation des bioagresseurs des agroforêts à cacaoyers au Cameroun et au Costa Rica*. In *Agroforesterie et services écosystémiques en zone tropicale*. Ed. Quæ Versailles, France, pp. 113-128.
- Numbisi N.F., Van Coillie, F.M.B. & De Wulf R., 2019. Delineation of Cocoa Agroforests Using Multiseason Sentinel-1 SAR Images: A Low Grey Level Range Reduces Uncertainties in GLCM Texture-Based Mapping. *International Journal of Geo-Information*, 8(179), 1-25. <https://doi.org/10.3390/ijgi8040179>
- Ouattara T.A., Kouamé K.F., Zo-Bi I.C., Vaudry R. & Grinand C., 2021. Changements d'occupation et d'usage des terres entre 2016 et 2019 dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire : impact des cultures de rente sur la forêt. *Bois et forêts des Tropiques*, 347, 89-104. <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/31868>
- Saj S., Jagoret P., Mvondo S.K., Essobo J.D., Bouambi E. & Todem-Ngogue H., 2019. Compromis entre séquestration de carbone, conservation et productivité dans les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers au Centre-Cameroun. In *Agroforesterie et services écosystémiques en zone tropicale*. Ed. Quæ Versailles, France, pp., 99-112.
- Sanogo D., Camara B.A., Diatta Y., Coly L., Diop M., Badji M. & Binam J.N., 2019. La régénération naturelle assistée dans le bassin arachidier du Sénégal, une alternative pour réduire la pauvreté en milieu rural. In *Agroforesterie et services écosystémiques en zone tropicale*, Ed. Quæ Versailles, France, pp. 175-190.
- Sheikh M.R.A. & Mohammad S.H., 2020. A Rule-Based Classification Method for Mapping Saltmarsh Land-Cover in South-Eastern Bangladesh from Landsat-8 OLI. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 47(3), 356-380.
- Stratoulas D.; Tolpekin V., De By R.A., Zurita-Milla R., Retsios V., Bijker W., Hasan M.A. & Vermote E., 2017. A Workflow for Automated Satellite Image Processing: from Raw VHRS Data to Object-Based Spectral Information for Smallholder Agriculture. *Remote Sens*, 9, 1048. <https://doi.org/10.3390/rs9101048>
- Wan Nurazwin Syazwani R., Muhammad Asraf H., Megat Syahirul Amin M.A. & Nur Dalila K.A., 2021. Automated image identification, detection and fruit counting of top-view pineapple crown using machine learning. *Alexandria Engineering Journal*, 61(2), 1265-1276. ISSN 1110-0168. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.053>
- Yu X., Lu D.; Jiang X., Li G. Chen Y., Li D. & Chen E., 2020. Examining the Roles of Spectral, Spatial, and Topographic Features in Improving Land-Cover and Forest Classifications in a Subtropical Region. *Remote Sens*, 12, 2907, <https://doi.org/10.3390/rs12182907>