



HAL
open science

Suivi par télédétection des affectations des terres pour la promotion d'une agriculture intégrée au développement forestier en Côte d'Ivoire

Valere Jofack Sokeng, You Lucette Akpa, Tchimou Vincent Assoma, Fernand Kouame, Samuel Corgne, Jean-Paul Rudant, Tiodionwa Ouattara, Foungnigué Sorho, Noellie Yao, Pascal Kouame

► To cite this version:

Valere Jofack Sokeng, You Lucette Akpa, Tchimou Vincent Assoma, Fernand Kouame, Samuel Corgne, et al.. Suivi par télédétection des affectations des terres pour la promotion d'une agriculture intégrée au développement forestier en Côte d'Ivoire. Conférence OSFACO: Des images satellites pour la gestion durable des territoires en Afrique, Mar 2019, Cotonou, Bénin. hal-02189403

HAL Id: hal-02189403

<https://hal.science/hal-02189403>

Submitted on 19 Jul 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Suivi par télédétection des affectations des terres pour la promotion d'une agriculture intégrée au développement forestier en Côte d'Ivoire

JOFACK SOKENG Valère Carin ^(1,2,*), AKPA You Lucette ⁽¹⁾, ASSOMA Tchimou Vincent ⁽¹⁾, KOUAME Koffi Fernand ^(1,2), Samuel CORGNE ⁽³⁾, Jean Paul RUDANT ⁽⁴⁾, OUATTARA Tiodionwa Abdoulaye ⁽¹⁾, SORHO Founignigué Mathias ⁽¹⁾, YAO Noellie ⁽¹⁾, KOUAME N'dri Pascal ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

⁽²⁾ Université Virtuelle de Côte d'Ivoire (UVCI), Abidjan, Côte d'Ivoire

⁽³⁾ Climat, Occupation du Sol par Télédétection (COSTEL), Université de Rennes 2, France

⁽⁴⁾ OTIG, Université Paris Est Marnes La Vallée, France

⁽⁵⁾ Office Ivoirien des Parcs et Réserves, Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (OIPR/ MEDD), Côte d'Ivoire

^(*) Auteur correspondant: JOFACK SOKENG Valère Carin, svalere.jofack@curat-edu.org

Résumé

Les défis actuels de l'administration forestière ivoirienne sont la reconstitution du couvert forestier du pays à l'horizon 2040 avec un taux de reforestation annuel de 20%. Cette étude propose une méthode de mise en place d'un système de suivi des affectations des terres pour une agriculture intégrée au développement forestier et une gestion durable des ressources forestières du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire à partir de l'exploitation d'images satellitaires d'archives (optique et radar). Les prétraitements et les traitements réalisés sur des images LANDSAT ont permis d'abord d'évaluer la dynamique de l'occupation de sol à l'échelle du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire entre les années 1986, 2001 et 2015, et d'identifier les zones forestières les plus exposées (forêt classée de la Haute Dodo et de Cavally) aux activités agricoles. Ensuite, dans la forêt de la Haute Dodo, l'exploitation conjointe de la résolution spatiale et spectrale des images SENTINEL-2 et SPOT-6 a conduit à l'élaboration d'une cartographie des différentes exploitations agricoles (cacao, hévéa, palmier à huile, café...) à l'origine de la baisse importante des surfaces forestières. Enfin, dans la forêt de Cavally, la bonne résolution temporelle des données radar SENTINEL-1 a permis de faire un suivi saisonnier et annuel des formations forestières. Cette étude montre que les données satellitaires multicapteurs et multirésolutions peuvent être intégrées pour assurer un suivi des forêts tant sur le plan régional que local. Ces outils d'aide à la décision constituent des éléments pertinents auprès des parties prenantes pour la mise en œuvre d'une politique d'inversion des tendances à la dégradation des terres et des ressources naturelles en Côte d'Ivoire.

Mots clés : LANDSAT, SENTINEL, Agriculture intelligente, Déforestation, dégradation des forêts, Côte d'Ivoire

Abstract

A current challenge of the Ivorian forestry administration is the restoration of up to 20% of the country's forest cover by 2040. This study proposes a method to set up a satellite (optics and radar) based land-use monitoring system for an integrated agriculture in forestry development and a sustainable management of forest resources in South-West Côte d'Ivoire. LANDSAT images preprocessing and processing techniques were used to evaluate land-use dynamics in the south-west of Côte d'Ivoire from 1986 to 2015, and to identify the most exposed forest areas (Haute Dodo and Cavally protected forests) to agriculture activities. This was followed by the analysis of Sentinel-2 and SPOT-6 spectral and spatial resolution data for Haute Dodo Forest to develop a map of agricultural (cocoa, rubber, palm trees, oil, coffee, etc.) production, which is responsible for the decline in forest areas. Finally, the good temporal resolution of Sentinel-1 radar data enabled seasonal and annual monitoring of the forest cover. The present study shows that the potential of multisensory and multiresolution satellite data approach can be integrated into a monitoring system at both local and regional levels. These decision-support tools are relevant for stakeholders in implementing policy to reverse the current trend of land and natural resource degradation in Côte d'Ivoire.

Keywords : LANDSAT, SENTINEL, Smart Agriculture, Deforestation, Forest Degradation, Côte d'Ivoire

1. INTRODUCTION

Selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat GIEC (2004), la déforestation a représenté 17% des émissions globales de gaz à effet de serre (GES) dans le monde et de façon singulière 28% des émissions de CO₂. Ces émissions affectent gravement le climat. Les accords de Paris de la Conférence des Parties (COP 21) et les initiatives de mise en œuvre effective des politiques « climat » pour un avenir meilleur (COP 22) sont au cœur de l'agenda international ; en témoignent les nombreux engagements mondiaux : Objectifs du Développement Durable (ODD), COP, etc. Il apparaît donc nécessaire de mettre en œuvre des processus politiques pertinents visant à atténuer les effets du changement climatique par la réduction des émissions des GES à travers la mise en œuvre de mécanismes de Réduction des Emissions de gaz à effet de serre, issues de la Déforestation et de la Dégradation des forêts (REDD+).

La Côte d'Ivoire est en tête des pays d'Afrique tropicale ayant connu la déforestation la plus importante (Moron, 1994). La superficie forestière de la zone dense humide de la Côte d'Ivoire, qui était estimée à plus de 16 millions d'hectares, dans les années 50, a considérablement baissé de nos jours, et elle ne dépasse guère 2 millions d'hectares (Brou, 2005). L'agriculture et l'exploitation forestière sont les causes les plus citées dans les pertes de surfaces forestières (Lanly, 1982 ; Oszwald, 2005). Ce sont les régions du Sud-Est et de l'Ouest qui sont les plus exposées aux défrichements, à cause de l'existence d'importants fronts pionniers aux limites des massifs forestiers (Brou, 2005 ; N'guessan et al., 2006 ; Dibi et al., 2008 ; Bio et al., 2016, Ouattara et al., 2016 ; Sorho et al., 2016 ; SEP-REDD+ et FAO, 2017). En effet, les activités d'exploitation illicite des ressources forestières ont contribué à une déforestation et une dégradation importante de la forêt en zone rurale ainsi que dans le domaine public et privé de l'état constitué par les parcs nationaux, les réserves naturelles et les forêts classées.

Les défis actuels de l'administration forestière ivoirienne sont la reforestation du pays avec un taux de couverture forestière de 20% à l'horizon 2040 et la mise en œuvre d'une politique de préservation de la forêt ivoirienne tout en développant l'agriculture (Ministère des Eaux et Forêts, 2018). Cela passe par un suivi de la dynamique des affectations des terres afin de proposer des projets de restauration du couvert forestier dans le cadre de la mise en œuvre du mécanisme REDD+.

A partir des outils/technologies de la géomatique (géodésie, informatique, télédétection et Système d'Information Géographique), l'évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol pourrait être abordée très aisément. En effet, l'utilisation de l'imagerie satellitaire permet de mettre en place un système de suivi et de gestion intégrée des terres et des ressources forestières pour un développement durable.

C'est tout l'intérêt de cette étude qui vise à proposer une méthode de mise en place d'un système de suivi satellitaire pour une agriculture intégrée au développement forestier et une gestion durable des ressources forestières du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire à partir de l'exploitation d'images satellitaires d'archives (optiques et radar).

2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude (Figure 1) est la région forestière du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Cette région est appelée « nouvelle boucle du Cacao » car la production cacaoyère et caféière y est très importante. Cette région abrite le Parc National de Taï, réserve des biosphères et patrimoine mondial de l'UNESCO et de nombreuses autres aires protégées (forêts classées, forêts communautaires, zones RAMSAR) qui ont été affectés par des déboisements intenses au cours des années de crises politico-militaires de 2002 à 2011. Deux sites pilotes ont été choisis (Forêts classées de la Haute Dodo et du Cavally) pour la réalisation de ce projet.

Le choix de cette région se justifie par le fait qu'elle fait partie des régions forestières les plus exposées aux défrichements, à cause de l'existence d'importants fronts pionniers aux limites des massifs forestiers. Elle est également devenue l'une des principales zones de production de culture de rente spécialement cacaoyère et hévéaculture. Ainsi, la connaissance des types d'affectation des terres est capitale pour relever de défis de promotion d'une agriculture intégrée au développement forestier et la mise en œuvre de la politique « Agriculture, zéro déforestation » initiée par l'Etat (Ministère des Eaux et Forêts, 2018).

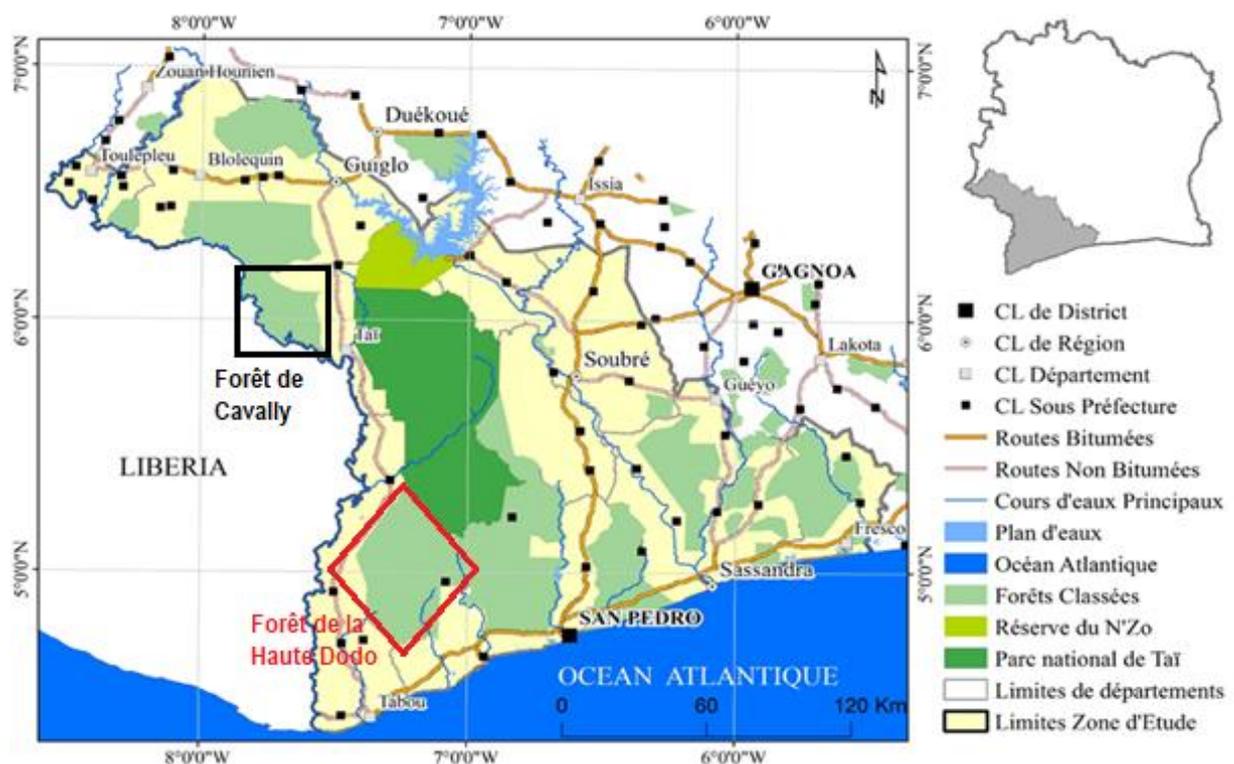


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude et aperçu des aires protégées du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire

3. DONNEES

Pour la réalisation de cette étude, une base de données contenant principalement des images satellitaires a été constituée. Elle comprend : (i) les données d'archives Landsat (TM, ETM+ et OLI de Janvier 1986, 2001 et 2015) de 30 m de résolution spatiale ; (ii) toutes les données radar Sentinel 1A (10 m) disponibles entre Décembre 2015 et Décembre 2016 ; (iii) les images Sentinel 2A (10 m) de Janvier 2016 ; et (iv) quelques images SPOT 6/7 de Janvier 2014, avec 5 m de résolution spatiale offertes par le projet OSFACO. Cette base de données d'images satellitaires mise en place est très adaptée pour retracer l'historique des conversions des surfaces forestières. Elle permet aussi de fournir une cartographie détaillée et un suivi saisonnier et annuel des sites pilotes choisis dans le cadre de ce projet.

4. METHODES

L'approche méthodologique adoptée a consisté essentiellement à exploiter la résolution spatiale et temporelle des images disponibles pour réaliser une analyse de l'évolution de l'occupation du sol. L'étude s'est déroulée à différentes échelles. Elle a commencé d'une part à grande échelle sur la zone d'étude avec l'utilisation des données d'archive Landsat pour retracer l'évolution des forêts entre 1986 et 2015 et pour identifier les zones les plus touchées par la déforestation. D'autre part, les études détaillées ont été réalisées à petite échelle sur les sites pilotes. Ces dernières ont visé un double objectif : (i) cartographier les activités agricoles à l'origine des pertes de surface forestières à l'aide des données optiques Sentinel 2 et SPOT 6 ; et (ii) utiliser les données radar Sentinel 1 de l'année 2016 pour identifier les périodes de l'année où les forêts subissent des agressions.

4.1. Étude des changements d'affectation des terres à l'échelle de la zone d'étude

L'étude des changements d'affectation des terres s'est déroulée en plusieurs étapes : (i) le prétraitement et le traitement des images ; (ii) la collecte des données de terrain pour la validation ; (iii) la cartographie ; et (iv) l'évaluation de la déforestation.

Le prétraitement d'images satellitaires est une étape importante dans l'étude et la détection des changements par télédétection. Il a pour but de rendre compatibles des images Landsat prises à des dates différentes (Jofack Sokeng et al., 2016). Cette opération permet également d'avoir des images plus fidèles à la réalité de terrain (Jofack Sokeng et al., 2016). Réalisé dans QGIS, il a consisté à appliquer aux images Landsat des années 1986, 2001 et 2015, des corrections radiométriques, atmosphériques, géométriques et des mosaïques. Puis, sur la zone d'étude extraite, plusieurs techniques de rehaussements et de transformations d'images ont été appliquées.

Ce sont : les combinaisons de bandes, les analyses en composantes principales, le calcul des ratios, le calcul des indices biophysiques (*Normal Difference Vegetation Index* (NDVI), *Perpendicular Vegetation Index* (PVI), *Normalized Difference Water Index* (NDWI) (Major et al., 1990 ; Wenlong, 2009 ; Jofack Sokeng et al., 2016 ; Xue et Su, 2017). Ceux-ci ont permis d'obtenir les meilleures

compositions colorées qui facilitent une bonne discrimination spectrale des grandes unités d'occupation de sol que sont : les forêts denses, les forêts dégradées, les cultures et jachères, les sols nus et habitations et les surfaces d'eaux.

Sur la base des caractéristiques spectrales des types d'occupation du sol identifiées, des sites d'échantillonnages ont été sélectionnés, visités et validés sur le terrain. Cette mission de terrain qui coïncidait au mois de prise de l'image, a permis de sélectionner des sites d'entraînement assez proches de la réalité terrain pour offrir une bonne classification supervisée des images.

La classification des images Landsat de l'année 2015 par maximum de vraisemblance (MDV) a d'abord été réalisée sur la base des sites d'entraînements collectés au cours des campagnes de terrain. Puis, avec pour référence les zones restées stables entre 1986 et 2015, celles des images des années 1986 et 2001 ont été réalisées. Enfin, les images classifiées converties en vecteurs, ont été exportées dans QGIS pour validation et analyse statistique descriptive. La validation, réalisée à la fois de façon thématique et statistique, a consisté à vérifier et à évaluer les précisions (globale et le Kappa) des classifications.

Sur la base des cartes d'occupation de sol des années 1986 et 2015, il a été possible d'identifier les régions forestières les plus affectées par les exploitations agricoles. L'approche basée sur l'algorithme de statistiques spatiales « *Hot Spot Analysis* » d'ArcGIS a été utilisée (Getis et Ord, 1992). Des opérations de géo-traitements et de croisement de couches de données vecteurs d'occupation du sol entre 1986 et 2015 ont par la suite permis d'élaborer des cartes de dynamique de l'occupation du sol et d'identifier les « points chauds » de déforestation dans cette région. Ces derniers ont servi de site pilote pour des études détaillées.

Deux sites ont été choisis : le premier site représente la forêt de la Haute Dodo où la pression anthropique a entraîné une disparition quasi-totale des forêts. Quant au second site (forêt de Cavally), il regorge encore des forêts. L'étude de ces sites consiste à détecter d'une part les principales cultures pratiquées, et d'autre part, à déceler la période de l'année où les forêts subissent des agressions.

4.2. Cartographie des types de cultures dans la forêt de la Haute Dodo

A la suite de la classification des images de la série Landsat qui a permis d'identifier les grandes unités cartographiques, l'interprétation conjointe des images de haute résolution spatiale (Sentinel 1A/2A et SPOT 6/7) a permis de discriminer plus en détail dans la forêt classée de la Haute Dodo, neuf unités d'occupation de sol (forêt, forêt dégradée, jachères, bas-fonds, cacao/café, palmier à huile, hévéa, défrichements récents, sols nus/localités et plan d'eau) et d'identifier les principales cultures à l'origine des pertes de forêts.

4.3. Suivi annuel des surfaces forestières dans la forêt classée du Cavally

La zone d'étude en général et la forêt de Cavally en particulier a présenté un grand nombre de défis en matière de cartographie à l'aide des images SPOT-6/7 et Sentinel 2A. Le potentiel des données radar (Sentinel 1A), qui s'affranchissent des nuages a été mis en évidence pour le suivi des surfaces forestières. Les produits Sentinel 1A utilisés à cet effet sont constitués de données SAR multi-look, projetées et géoréférencées. Sur ces images d'amplitude radar de polarisation croisée (VV+VH), des prétraitements ont été effectués à l'aide du logiciel ESA SNAP. Il s'agit de :

- Une calibration radiométrique (extraction des valeurs des coefficients de rétrodiffusion radar en utilisant les paramètres du capteur stockés dans les métadonnées) à partir de l'outil « *Radiometric calibrate* ». Ces valeurs de rétrodiffusion radar ont été converties en décibel (dB) ;
- Un géocodage et une correction terrain à partir de la méthode *Range Doppler Terrain Correction* (Small et Schubert, 2008) fournissant des produits orthorectifiés, les images calibrées ont subi des filtres spatiaux de réduction de *Speckle* (bruits de chatoiement) à l'aide des filtres adaptatifs de Lee et Frost (Lee et al, 1994 ; Frost et al. 1982) ;
- Enfin, une analyse statistique des classes d'échantillonnage des massifs forestiers a permis de produire des signatures rétrodiffusionnelles ayant servi à la cartographie des couverts forestier par la méthode de segmentation.

La rétrodiffusion moyenne mensuelle a été calculée pour toutes les images d'un même mois tandis que celle annuelle concerne l'ensemble des images mensuelles de l'année. Elle a permis de différencier l'eau, les zones urbaines et les forêts. Cette approche a eu un double avantage : de permettre un suivi annuel de la forêt ; et de faciliter une segmentation des couverts forestiers. D'autre part, l'écart-type sur les mêmes acquisitions pour cette période a été calculé pour chaque pixel. Les images d'écart-type ont permis de distinguer les zones où la surface change de manière significative au cours de l'année ainsi que celles qui restent inchangées. Cela a été important pour identifier les terres qui sont cultivées et a aidé à mettre en évidence les changements tels que la dégradation dans les zones forestières.

5. RESULTATS ET DISCUSSION

5.1. Dynamique régionale de l'occupation de sol

Les cartes réalisées (Figure 2) à partir des images Landsat présentent une bonne précision globale allant de 78 à 80%. Des confusions existent notamment entre les forêts dégradées, les jachères et les cultures pérennes. Cela dénote de la complexité et de la forte hétérogénéité des formations observées soulevées par N'guessan et al. (2006), Dibi (2008), Bio et al. (2016) et SEP REDD et FAO (2018).

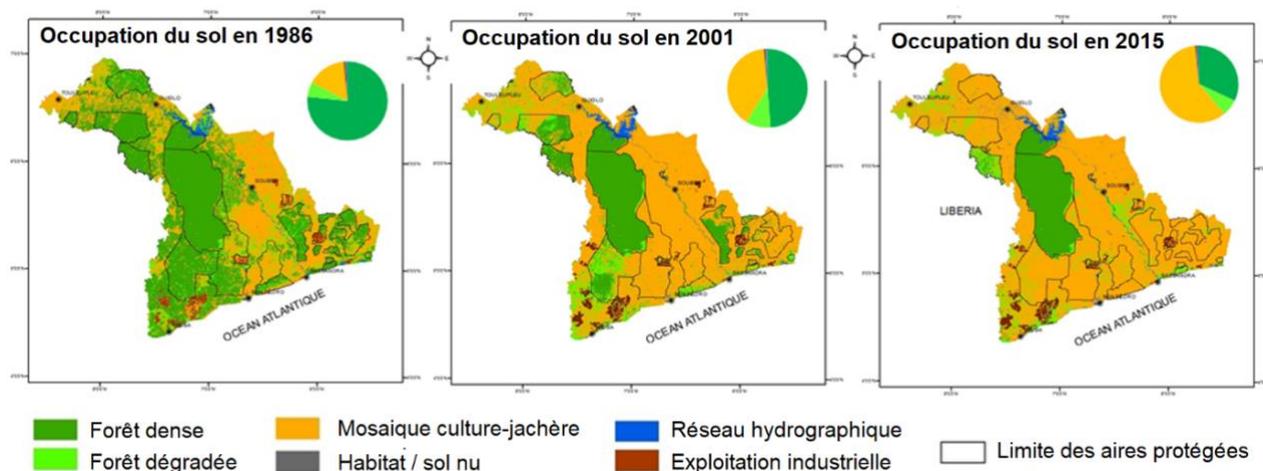


Figure 2 : Cartes d'occupation de 1986, 2001 et 2015 issues des images Landsat (MSS, TM et OLI)

Une analyse visuelle et statistique (Tableau 1) de la dynamique globale de l'occupation/utilisation des sols montre une forte dégradation des surfaces forestières au profit des surfaces agricoles. En effet, les formations forestières qui occupaient plus de 46% (19 363,2 km²) de la superficie de la zone d'étude en 1986 sont passées à seulement 13% (5 444,9 km²) en 2015, soit une réduction d'environ 13 918,2 km² (soit 71,8%) ou encore une perte moyenne de 479,9 km²/an. De même, les espaces agricoles (toutes les mosaïques jachères-cultures) sont passées de 36% à 69%, soit un accroissement global des superficies de 13 591 km² (soit 33%). Ainsi, sous la pression agricole, les surfaces de forêts de la zone sud-ouest sont aujourd'hui presque exclusivement réduites au parc national de Taï qui occupe les 58% des forêts restantes.

Tableau 1 : Dynamique de l'occupation du sol

| Occupation du sol | 1986 | | 2001 | | 2015 | |
|--------------------------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|
| Forêt dense | 19363,23 | 46,78 | 8571,4 | 20,70 | 5444,94 | 13,15 |
| Forêt dégradée | 3489,82 | 8,43 | 3377,93 | 8,16 | 3147,64 | 7,60 |
| Mosaïque Culture + Jachères | 15168,6 | 36,65 | 25691,95 | 62,05 | 28760,39 | 69,44 |
| Habitat et sol nu | 166,85 | 0,40 | 231,56 | 0,56 | 501,62 | 1,21 |
| Hydrographie | 516,64 | 1,25 | 562,86 | 1,36 | 568,75 | 1,37 |
| Exploitation Agro-industrielle | 697,39 | 1,68 | 967,55 | 2,34 | 981,04 | 2,37 |

L'analyse par statistique spatiale (Figure 3) montre une disparition quasi-complète des forêts dans les aires protégées. Seulement 23% des surfaces forestières de 1986 ont échappé à la déforestation (Tableau 2) tandis que plus de 54% des forêts ont été entièrement converties. Seul le Parc National de Taï (PNT)

a subi des pertes limitées, en comparaison aux autres aires protégées qui ont pratiquement toutes disparues (Figure 3).

Tableau 2 : Superficies des différentes mutations forestières entre 1986 et 2015

| Mutation des formations forestières de 1986 à 2015 | Superficies (Km ²) | % |
|--|--------------------------------|-------|
| Forêt dense restée Forêt dense | 5 370,12 | 23,50 |
| Forêt dense devenue forêt dégradée | 1 635,45 | 7,16 |
| Forêt dense devenue autre chose que forêt | 12 357,66 | 54,07 |
| Forêt dégradée restée forêt dégradée | 418,71 | 1,83 |
| Forêt dégradée devenue forêt dense | 20,98 | 0,09 |
| Forêt dégradée devenue autre chose que forêt | 3 050,13 | 13,35 |

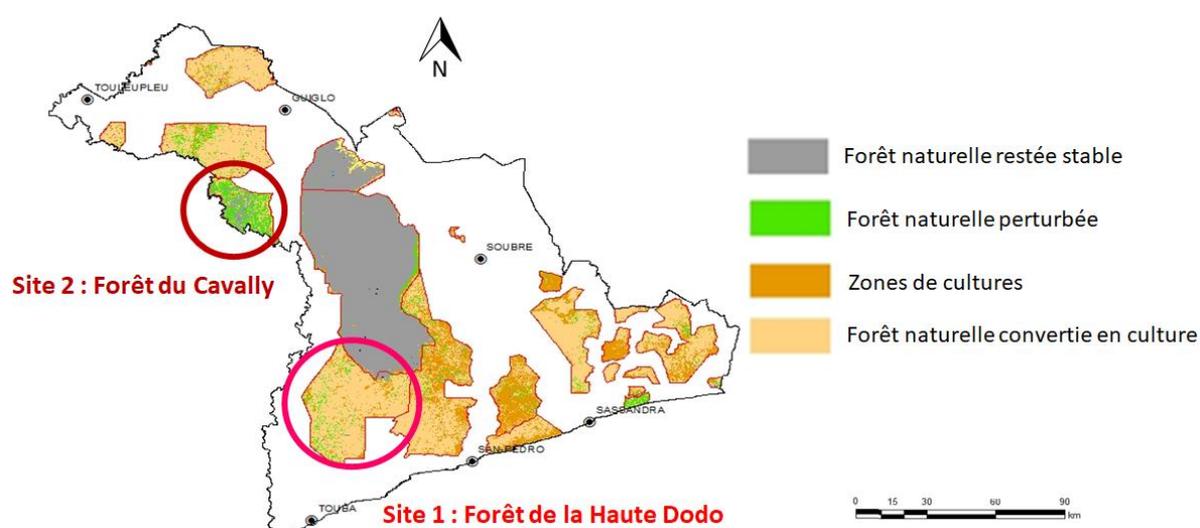


Figure 3 : Carte des changements d'occupation de sol entre 1986 et 2015

Les Tableaux 3 et 4 représentent respectivement les mutations subies par les forêts denses et dégradées. Ils permettent de noter que de 1986 à 2015 42% des surfaces de forêts denses sont restées stables contre 58% de mutation. A l'opposé, la quasi-totalité des forêts dégradées (88%) a disparu, et est transformé en des types d'occupation du sol autres que les forêts. L'analyse plus fine permet de dire que les forêts denses et dégradées ont disparues sous la menace principale des défrichements agricoles qui ont converti ces espaces en zone de mosaïque culture jachère. En effet à plus de 87% pour les forêts dense et 97% pour les forêts dégradées, les défrichements agricoles ont été les moteurs de la déforestation. Des causes similaires sont observées dans plusieurs pays forestiers d'Afrique de l'Ouest (Ghana, Togo, Bénin) et

Centrale (Cameroun, Gabon) où les populations exploitent les terres forestières encore disponibles au niveau des domaines protégés pour satisfaire à leurs besoins de plus en plus élevés en terres. Les exploitations agroindustrielles, la fluctuation du niveau des eaux (lacs, lagune), l'urbanisation et les sols nus ou la réalisation d'infrastructures de développement ne sont responsables que de moins de 3% des pertes des surfes de forêts.

Tableau 3 : Matrice de transition des forêts denses de 1986 à 2015

| | Forêt dense en 1986 | | |
|-------------------------------|-----------------------------|-------|---------------|
| | Surfaces (Km ²) | | % |
| Forêt dense en 2015 | 8 141,45 | 42,05 | 42,05 |
| Forêt dégradée | 2 250,22 | 11,62 | 57,95% |
| Mosaïque jachère culture | 8 732,89 | 45,1 | |
| Habitat et sol nu | 39,21 | 0,2 | |
| Hydrographie | 45,33 | 0,23 | |
| Exploitation agroindustrielle | 154,13 | 0,8 | |

Tableau 4 : Matrice de transition des forêts dégradées de 1986 à 2015

| | Forêt dégradée 1986 | | |
|-------------------------------|-----------------------------|--------------|--------------|
| | Surfaces (Km ²) | | % |
| Forêt dégradée en 2015 | 407,02 | 11,66 | 11,66 |
| Forêt dense | 219,18 | 6,28 | 88,34 |
| Mosaïque jachère culture | 2 774,34 | 79,5 | |
| Habitat et sol nu | 15,86 | 0,45 | |
| Hydrographie | 47,56 | 1,36 | |
| Exploitation agroindustrielle | 25,86 | 0,74 | |

5.2. Cartographie de l'occupation de sol dans la forêt classée de la Haute Dodo

Dans la Haute Dodo, l'analyse ponctuelle des occupations du sol en 2016 à l'aide des images (Sentinel 2A et SPOT 6/7) montre une dominance de la classe cultures (Figure 4) avec une disparition totale des forêts primaires. Les images SPOT ont permis d'affiner l'identification et les résultats de la classification. Ainsi, parmi les unités identifiées, figurent le cacao, le café, l'hévéa, le palmier à huile, les nouveaux défrichements et les bas-fonds (Tableau 5). Les bas-fonds, avec 5,79% de la forêt classée,

sont utilisés pour la riziculture associée à quelques zones de raphias. Les cultures de cacao/café, représentant 50,29%, sont les cultures extrêmement répandues. Ils apparaissent rarement dans des parcelles visiblement structurées. Les palmiers à huile sont pour la plupart de grandes plantations commerciales généralement disposées en grilles de blocs bien définies qui n'occupent cependant que 1,18% de la superficie totale de la Haute Dodo. Les plantations d'hévéa (2,39%) ont une structure claire avec des limites généralement distinctes. Enfin, les nouveaux défrichements, avec 32,78%, représentent les surfaces récemment défrichées en vue de l'installation de nouvelles cultures (cacao, hévéa, palmier, culture annuelle). Ces cultures sont les principaux responsables de la baisse des surfaces de forêts dans cette forêt classée. En 2016, le taux de forêt restant est estimé à seulement 2,68%.

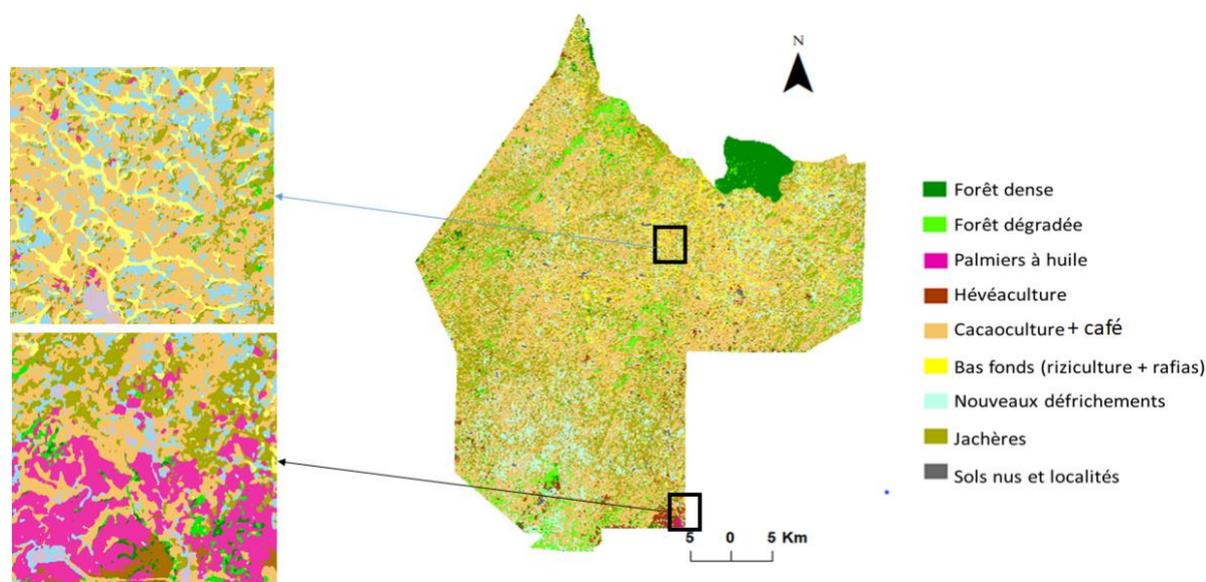


Figure 4 : Carte d'occupation de sol de la Forêt Classée de la Haute Dodo issue des images Sentinel-2A (2015)

Tableau 5. Analyse du taux de couverture des unités d'occupation du sol, forêt classée de la Haute Dodo

| Occupation de sol | Superficies (Km ²) | Pourcentage |
|-----------------------|--------------------------------|-------------|
| Bas-fond | 122,61 | 5,79 % |
| Cacao | 1065,53 | 50,29 % |
| Eau | 1,32 | 0,06 % |
| Forêts | 56,75 | 2,68 % |
| Hévéa | 50,60 | 2,39 % |
| Localités et sols nus | 102,54 | 4,84 % |
| Nouveau Défrichement | 694,26 | 32,77 % |
| Palmier | 25,06 | 1,18 % |

Les différents types d'occupation du sol ont été discriminés avec une précision cartographique globale de 89,9 % et un indice de Kappa de 0,86. Ils montrent le potentiel de cartographie détaillée qu'apportent les données Sentinel 2 et SPOT 6 à cette étude. Ces valeurs sont proches de celles de Sagne et al. (2015), Bio et al. (2016), Sorho et al. (2016) et Ouattara et al. (2016) qui ont travaillé au Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. En effet, Sagne et al. (2015) dans le Haut Sassandra ont utilisé les données SPOT (20m) et ont obtenu une précision de 92%. Bio et al. (2016) ont obtenu une précision de 93% en classifiant les images Landsat (30 m) et MODIS (250 m) de la zone d'étude. De même, Sorho et al. (2016), ont obtenu une précision de 88% en classifiant les images Alos (12,5 m) et ENVISAT (12,5 m) de cette région.

Cependant, même si les résultats obtenus sont comparables avec ceux obtenus par ces auteurs en ce qui concerne les précisions cartographiques, ils ne sont pas en phase avec les classes obtenues par leurs travaux. En effet, au niveau de la classification, ces travaux antérieurs ont mis en évidence 5 types d'occupation de sol. Le type de culture et la différenciation culture-jachère n'a été guère possible. Les données Sentinel utilisées dans la présente étude, grâce à leurs résolution spatiale (10 m) et spectrale (13 bandes), sont capable de mettre en évidence plus d'unités d'occupation de sol que les images Landsat, MODIS, Alos, ENVISAT et SPOT 4 utilisées dans les travaux antérieurs. Elles ont contribué aussi à dissocier les cultures des jachères et à rendre possible la cartographie des différentes spéculations développées dans la forêt classée de la haute Dodo.

Enfin, la dominance des parcelles agricoles sur les forêts, conséquence d'une pression foncière importante, a déjà été signalée par Sagne et al. (2015), Bio et al. (2016), Ouattara et al. (2016) dans la zone d'étude et en Côte d'Ivoire. Cette situation est attestée par l'existence de pistes et de localités (102,54 km² de superficie) au sein de la forêt.

5.3. Suivi annuel du couvert forestier au sein de la FC de Cavally

Dans la forêt classée de Cavally, où il existe encore des reliques de forêts, la comparaison des superficies forestières extraites sur les images Landsat entre décembre 2015 et 2016, montre des pertes considérables de forêt en l'espace d'une année (Tableau 6 ; Figure 5). Le taux de dégradation de la forêt a atteint 38,6% ; soit une régression de la classe forêt de 80,5% à 42,9% entre 2015 et 2016.

Tableau 6 Analyse des occupations du sol de la forêt classée du Cavally entre 2015 et 2016

| Occupation du sol | Forêt | Forêt dégradée | Cultures | Bâti/sol nu | Eau | TOTAL |
|--------------------------|--------------|-----------------------|-----------------|--------------------|------------|--------------|
| Superficies 2015 (ha) | 51556,4 | 5521,4 | 3665,1 | 8195,1 | 630,2 | 69568,2 |
| Superficies 2016 (ha) | 27092,7 | 24396,5 | 7946,6 | 9758,6 | 373,8 | 69568,2 |

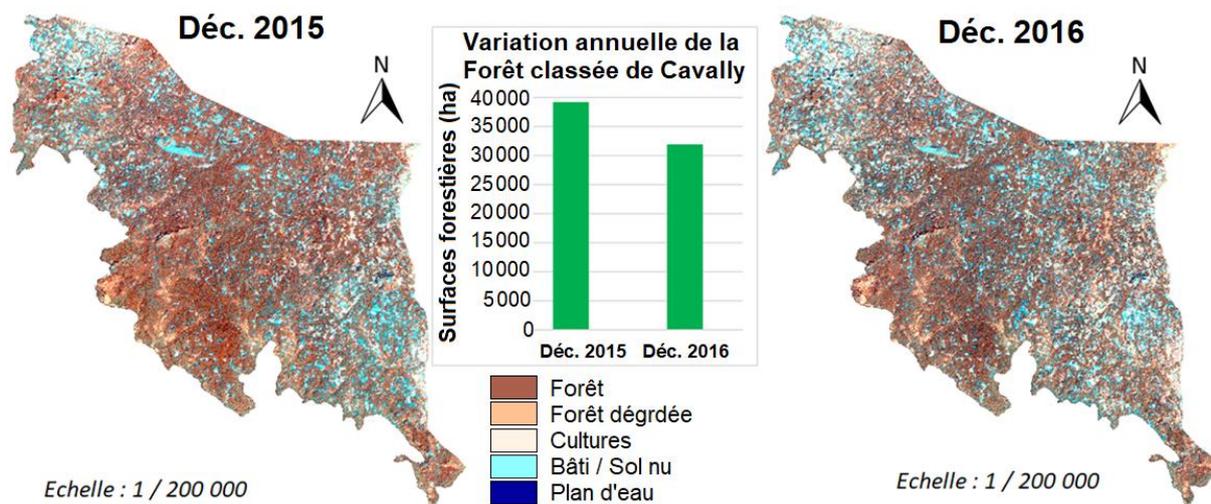


Figure 5. Variation annuelle des surfaces forestières dans la Forêt Classée de Cavally issue des images OLI de Landsat-8

Le suivi annuel à partir des images Sentinel-1A présente une variation saisonnière des états de surfaces forestières (Tableau 7). L'analyse des forêts de Janvier à décembre 2016 dans le Cavally (Figure 7) montre des diminutions importantes du couvert forestier de Janvier à Mai avec des superficies allant de 41517,5 ha à 28530 ha. Cette période correspondant à la grande saison sèche pourrait expliquer le faible coefficient de rétrodiffusion (Favras, 2015). Dans la période de juin à décembre correspondant majoritairement à la période la plus humide de l'année, on observe une faible variation des états de surfaces forestières (32550 ha à 27676,7 ha). Ainsi, le suivi annuel réalisé sur la base de Sentinel 1 (Figure 6) montre qu'il existe une corrélation entre le coefficient de rétrodiffusion extrait de l'image radar et la pluviométrie et donc l'humidité du sol. En effet, d'après les travaux de Favras (2015) l'humidité du sol impacte fortement la rétrodiffusion altimétrique ; ce qui se traduit par des coefficients de rétrodiffusion altimétriques plus élevés en saison humide par rapport à la saison sèche. Les pluies et les changements de températures peuvent influencer la rétrodiffusion radar en modifiant les propriétés du milieu (Ranson et Sun, 1997). Ainsi, la pluie a pour effet d'augmenter la rétrodiffusion radar du couvert forestier (Dobson et al, 1991b). Cependant, il existe peu d'études concernant l'influence du feuillage sur la rétrodiffusion radar. Hoekman (1985), Dobson *et al.* (1991b) et Ahern *et al.* (1993) observent que la réponse en hiver sur les forêts tempérées est supérieure à celle observée en été. En effet, une analyse plus en détail sur l'occupation des sols et le type des sols et même la texture de sol a montré que la rétrodiffusion est plus élevée sur les aires cultivées que sur celles où il y a de la végétation naturelle dans les travaux de Ekecier (2011) portant sur la cartographie de l'occupation de sol. De plus l'activité foliaire fortement tributaire de la pluviométrie pourrait être un facteur à prendre en compte dans la variation des états de surfaces forestières (Ali et al., 2017 ; Torbick et al. 2017).

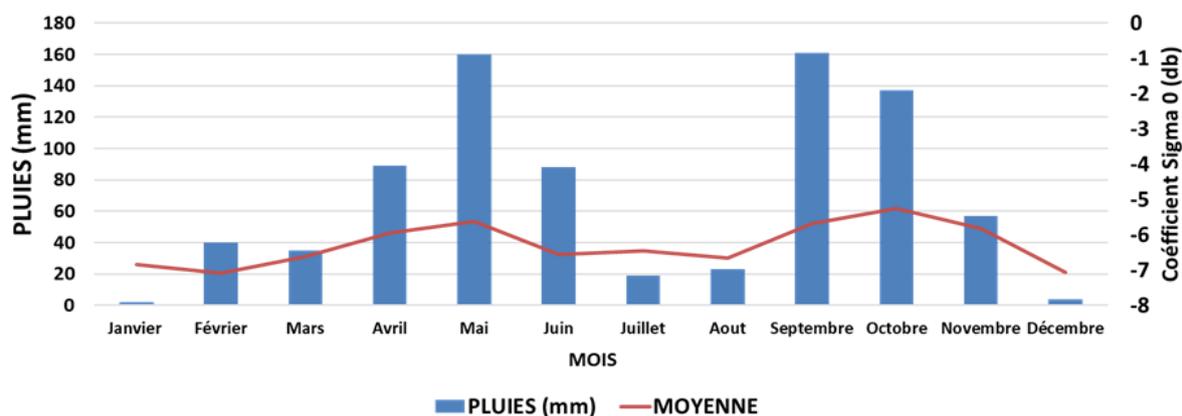


Figure 6 : Relation entre la variation des coefficients de rétrodiffusions radar du couvert forestier et les saisons à travers la pluviométrie de la forêt classée du Cavally (2016)

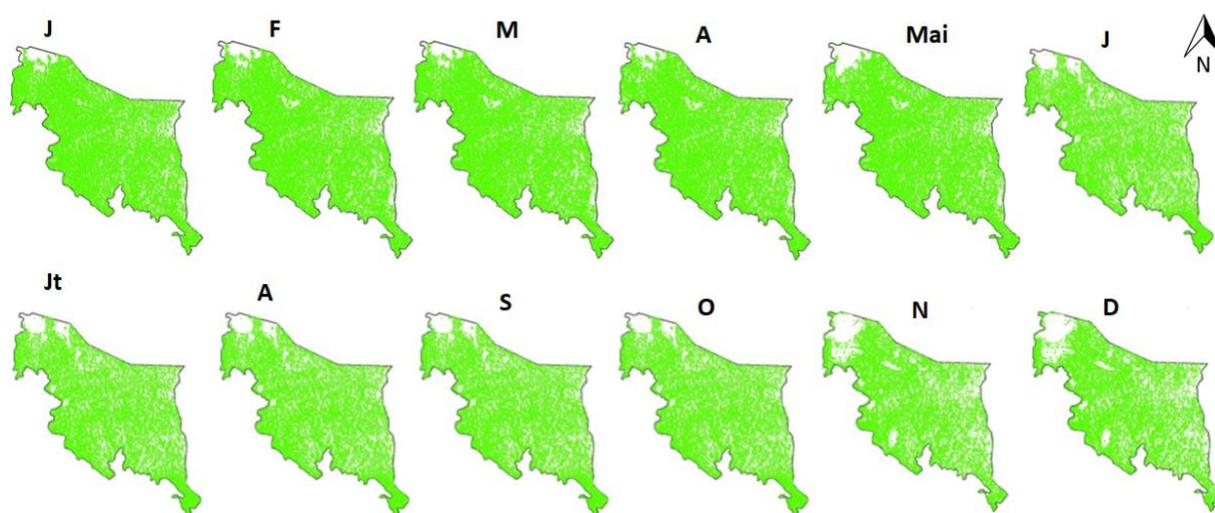


Figure 7 : Variabilité inter-saisonnière du couvert forestier dans la forêt classée du Cavally

Tableau 7 : Superficies forestières et coefficient de rétrodiffusion de la zone d'étude

| | | | | | | |
|-------------|----------------|----------------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Mois | Janvier | Février | Mars | Avril | Mai | Juin |
| Superficies | 41517,5 | 34000,5 | 24996,9 | 28665,1 | 28530,3 | 32550,0 |
| Sigma0 (db) | -6,83 | -7,08 | -6,60 | -5,93 | -5,62 | -6,56 |
| Mois | Juillet | Aout | Septembre | Octobre | Novembre | Décembre |
| Superficies | 28195,6 | 29662,7 | 29195,9 | 28857,1 | 27818,6 | 27676,7 |
| Sigma0 (db) | -6,46 | -6,65 | -5,68 | -5,24 | -5,82 | -7,07 |

6. CONCLUSION

Cette étude a exploité une banque de données d'images satellitaires pour améliorer les connaissances sur les vecteurs de changement des affectations des terres. Elle a proposé aussi une méthode de mise en place d'un système de suivi des ressources forestières au Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire.

Les images Landsat, Sentinel 2, SPOT ont permis d'identifier les cultures telles que le cacao, le café, l'hévéa, le palmier à huile et le riz comme principales responsables de la disparition quasi-totale des forêts dans les aires protégées entre les périodes 1986 et 2015. Quant aux images Sentinel 1, elles ont permis d'effectuer un suivi annuel de la végétation grâce à leurs bonnes résolutions spatiales et temporelles. La corrélation entre les calculs du coefficient de la rétrodiffusion radar et les mesures de précipitation a indiqué que la variabilité de ce coefficient est un critère important pour le suivi de l'évolution du couvert végétal. Dans la forêt du Cavally, les changements observés sont plus marqués en saison sèche pendant laquelle évoluent les cultures identifiées.

Dans l'optique de promouvoir une agriculture intégrée au développement forestier, la connaissance du type de culture à l'origine de la baisse de forêt et l'identification des moments où les forêts subissent des agressions sont des informations capitales. Cette étude constitue donc une opportunité pour les autorités en charge de l'aménagement forestier, de la conservation et de la protection des ressources forestières. Elle leur permettra non seulement de développer une approche méthodologique pour l'estimation des variations des surfaces forestières, mais aussi de mettre en œuvre la politique d'inversion des tendances pour le développement d'une agriculture intelligente. Elle aidera enfin à relever les défis actuels de l'administration forestière et à la mise en œuvre de la politique « Agriculture, zéro déforestation ».

Références bibliographiques

- Ali H. T. O., Niculescu S., Sellin V., Bougault C., 2017. Contribution de la nouvelle série d'images Sentinel-1 pour le suivi de la végétation côtière dans le Pays de Brest. Spatial Analysis and GEOmatics, Nov 2017, Rouen, France.
- Bio Y. K. A., Kouamé F. K., N'da D. H., Brou Y.T., Jofack Sokeng V.-C., Hauhouot A. C., Kouadio K., Kouamé J., Rudant J-P., 2016. Étude de la dynamique forestière du sud-ouest de la Côte d'Ivoire par télédétection optique (moyenne et haute résolution spatiale) : contribution des images MODIS ET LANDSAT. 2ème Conférence Internationale GEOFORAFRI, Abidjan, 26 – 28 Janvier 2016, Communication orale.
- Brou Yao T., Oszwald J., Bigot S., Servat Eric., 2005. Risques de déforestation dans le domaine permanent de l'état en Côte d'Ivoire : quel avenir pour ces derniers massifs forestiers ? Télédétection, 5 (1-2-3). 263-275. ISSN 1028-7736

- Dibi H. N., N'Guessan E. K., Wajda M. E., Affian K., 2008. Apport de la télédétection au suivi de la déforestation dans le Parc National de la Marahoué (Côte D'ivoire). Bulletin - Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, pp.17-34.
- Dobson, M. C., McDonald, K. C., Ulaby, F. T., Sharik, T., 1991. Relating the temporal change observed by AIRSAR to surface and canopy properties of mixed conifer and hardwood forests of northern Michigan. Proc. 3rd Airborne Synthetic Aperture Radar (AIRSAR) workshop, May 20-24, JPL Publications 91-30, pp. 34-43.
- Fatras C. Étude de la rétrodiffusion altimétrique pour la caractérisation des surfaces et de l'humidité des sols en Afrique de l'Ouest.. Electromagnétisme. Université de Toulouse, 2015. Français. tel-01212801.
- Frost V.S., Stiles J., Shanmugan K. and Holtzman J., 1982. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 4, n°2, p. 157-165.
- Getis A., et Ord K., 1992. The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. Geographical Analysis 24:189-206.
- GIEC, 2005. Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group III, Cambridge University Press, Cambridge University Press, Cambridge UK, 431 p.
- Hoekman D. H., 1985. Radar backscattering of forest stands. Int. J. Remote Sensing 6(2) : pp. 325-343
- Jofack Sokeng V.-C., Kouamé F.K., Dibi N'da H., B. Tankoano, Akpa You L., Ngounou Ngatcha B. (2016). Cartographie de l'occupation de sol des Hauts Plateaux de l'Ouest Cameroun par réseaux de neurones appliqués à une image LANDSAT 8 OLI. International Journal of Innovation and Scientific Research. Vol. 23 No. 2 May 2016, pp. 443-454.
- Lanly J.P., 1982 - Les ressources forestières tropicales - Etude FAO : Forêts 30 - Rome, 113 p.
- Lee J.S., Jurkevich I., Dawaele P., Wambacq P. and Oosterlinck A., 1994. Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review. Remote Sensing Reviews, vol. 8, p.313-340.
- Major, D. J. Baret F. and Guyot G. (1990). A ratio vegetation index adjusted for soil brightness. International Journal of Remote Sensing, vol.11, no.5, pp.727-740.
- Ministère des Eaux et Forêts, 2018. Politique nationale de préservation, de réhabilitation et d'extension des forêts, 24 p.
- Moron V., 1994. Guinean and sahelian rainfall anomaly indices at annual and monthly scales (1933-1990). *Int. Jour. of climatology*. Vol 14, pp 325-340.

- N'guessan K. E. et N'da D. H., Bellan M. F., Blasco F., 2006. Pression anthropique sur une réserve forestière en Côte d'Ivoire: *Apport de la télédétection. Télédétection*, Vol. 5, n° 4, pp. 307 -323
- Oszwald J., 2005. Dynamique des formations agroforestières en Côte d'Ivoire (des années 1980 aux années 2000), Suivi par télédétection et développement d'une approche cartographique. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 304 pp.
- Ouattara T.A, Kouamé K.F., N'da D.H., Brou Y.T., Jofack Sokeng V. - C., Hauhouot A. C., Kouadio, J. Kouamé K., Rudant J-P., 2016. Utilisation des données LiDAR pour la détection des trouées et des zones de déforestation et de dégradation dans la Forêt Classée de Bolo-Est (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). 2ème Conférence Internationale GEOFORAFRI, Abidjan, 26 – 28 Janvier 2016, Communication orale.
- Ranson, K. J. and Sun, G., 1997. Effect of environmental temperatures on SAR forest biomass estimates. Proc. IGARSS'97 Symp., Singapore, August, pp. 1722-1724.
- Sangne, C. Y., Barima, Y. S. S., Bamba, I., N'Doumé, C. A. , 2015. Dynamique forestière post-conflits armés de la Forêt classée du Haut-Sassandra (Côte d'Ivoire). [VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement, Vol. 15, no. 3, 18 p.
- SEP-REDD+ et FAO, 2017. Données de base pour la REDD+ en Côte d'Ivoire. Cartographie de la dynamique forestière de 1986 à 2015. Abidjan, Rome.
- Small D., Schubert A., 2008. Guide to ASAR Geocoding. *RSL-ASAR-GC-AD*, Issue 1.0, 2008.
- Sorho F.M, Kouamé K.F., N'da D.H., Brou Y.T., Jofack Sokeng V.-C., Hauhouot A. C., Kouadio K., Kouamé J., Rudant J-P., 2016. Apport comparé des images SAR polarimétriques en bandes C et L à la cartographie des massifs forestiers du Sud-ouest de la Cote d'Ivoire. 2ème Conférence Internationale GEOFORAFRI, Abidjan, 26 – 28 Janvier 2016, Communication orale.
- Torbick N., Chowdhury D., Salas W., Qi J., 2017. Monitoring Rice Agriculture across Myanmar Using Time Series Sentinel-1 Assisted by Landsat-8 and PALSAR-2. *Remote Sens.* 9, 119.
- Xue J. and Su B., 2017. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*, vol. 2017, 17 p. doi.org/10.1155/2017/1353691.
- Wenlong X. D. L., 2009. Vegetation index controlling the influence of soil reflection. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/>

Remerciements. Les auteurs adressent leurs vifs remerciements à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et au Projet OSFACO pour le financement de ces travaux.