

Potentialités des données de télédétection optique et radar libres d'accès pour l'évaluation et le suivi des écosystèmes forestiers tropicaux : étude de cas au Togo, en République Démocratique du Congo, en Guyane française et en République Dominicaine

Anoumou Kemavo

▶ **To cite this version:**

Anoumou Kemavo. Potentialités des données de télédétection optique et radar libres d'accès pour l'évaluation et le suivi des écosystèmes forestiers tropicaux : étude de cas au Togo, en République Démocratique du Congo, en Guyane française et en République Dominicaine. Sciences de l'information et de la communication. Université Paris-Est, 2018. Français. ⟨NNT : 2018PESC2181⟩. ⟨tel-02384384⟩

HAL Id: tel-02384384

https://theses.hal.science/tel-02384384v1

Submitted on 28 Nov 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.



HAL Authorization

UNIVERSITE PARIS EST

ECOLE DOCTORALE :

MSTIC : Mathématiques Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication

THÈSE DE DOCTORAT

Champ disciplinaire :

Sciences et Technologies de l'Information Géographique

Auteur

KEMAVO Anoumou

Titre

Potentialités des données de télédétection optique et radar libres d'accès pour l'évaluation et le suivi des écosystèmes forestiers tropicaux : Études de cas au Togo, en République Démocratique du Congo, en Guyane Française et en République Dominicaine

Thèse dirigée par :

Jean Paul RUDANT

Soutenue à Paris au Siege de l'ONF, le 14 Décembre 2018 à 15 h

Jury:

Jean Paul RUDANT	Professeur UPEMLV	Directeur de thèse
Jean Marie NICOLAS	Professeur Télécom Paris-Tech	Rapporteur
Bernard RIERA	Chargé de recherche HDR CNRS	Rapporteur
Odile PICON	Professeur UPEMLV	Examinatrice
Cédric VEGA	Chargé de recherche HDR IGN	Examinateur
Stéphane GUITET	Docteur à l'IGN	Examinateur
Fransco SARTI	Docteur à l'ESA	Membre invité

Laboratoire ESYCOM/ Equipe : TIG (Télédétection et Information Géographique)
5, Boulevard Descartes, 77454 Champs sur Marne (France)

Dédicace

« La pierre qu'avaient rejetée les bâtisseurs, c'est elle qui est devenue pierre de faîte ; c'est là l'œuvre du seigneur et elle est admirable à nos yeux » ***Matthieu 21-42.***

A Dieu le père tout puissant, à lui la gloire, la magnificence pour l'éternité. Il m'a fait grâce de son amour et de sa bénédiction.

A mon premier né ***Benoît Koko KEMAVO****, puisse l'éternel t'accorder la sagesse et le discernement tout au long de ta vie.*

A celle qui remplit ma vie de bonheur et de tendresse et qui n'a jamais cessé d'être là.

A mon père défunt puisse ton âme trouver le repos éternel dans la paix.

Remerciements

Au terme de ce travail, il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma reconnaissance et ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation.

Je tiens tout d'abord à exprimer toute ma gratitude au Professeur Jean Paul RUDANT, mon Directeur de thèse, pour ce travail réalisé en équipe, pour l'encadrement, l'orientation, l'accompagnement et son soutien sans faille.

Mes remerciements vont également au responsable du laboratoire ESYCOM, pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire.

Je remercie la direction d'ONF International, pour avoir favorisé l'aboutissement de ce projet personnel dans un environnement professionnel exceptionnel. C'est l'occasion d'exprimer ma reconnaissance à tous mes collègues et ami(e)s du 45 bis avenue de la Belle Gabrielle pour leurs encouragements et leur soutien moral.

J'adresse ma reconnaissance et mes remerciements à Abdourrahmane ATTO pour la collaboration avec le Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance (LISTIC), de l'université Savoie Mont Blanc pour le travail réalisé sur le site de Saint-Georges de l'Oyapock.

J'adresse toute ma sympathie et mes sincères remerciements à Martin RAPILLY Enseignant-Chercheur à l'Université Autonome de Saint Domingue pour m'avoir proposé le site de la province de Monté Cristi ainsi que pour son accompagnement et sa disponibilité durant les deux missions effectuées sur le terrain en Juin et Septembre 2018.

J'adresse toute ma reconnaissance au Professeur Kouami KOKOU, Professeur Titulaire des Universités de CAMES, Enseignant-chercheur à la Faculté des Sciences de l'Université de Lomé, pour ses conseils et ses remarques constructives. Qu'il soit assuré de ma profonde gratitude et de mon respect.

Je tiens également à remercier :

- Messieurs Jean Marie NICOLAS, Professeur Télécom Paris-Tech et Bernard RIERA, Botaniste-Ecologiste, Chargé de recherche au CNRS pour avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse ;
- Messieurs Cédric VEGA (IGN/Nancy), Stéphane GUITET (IGN) et Madame Odile PICON Professeur émérite à l'UPEMLV pour avoir accepté d'examiner ce travail ;
- Messieurs Fransesco SARTI, Docteur Agence Spatiale Européenne et Stéphane GUITET Docteur à l'IGN pour avoir accepté l'invitation à assister à cette soutenance.

Les résultats de cette thèse doivent beaucoup au soutien :

- De Cédric LARDEUX, collègue et ami à ONF International, également ancien doctorant du laboratoire OTIG, pour les conseils et les orientations techniques durant ce travail.
- Du GIP-ECOFOR pour les moyens mis à notre disposition pour la réalisation de certains travaux de terrain à travers le projet Carthaforum.
- Du ministère de la Transition écologique et solidaire, pour les moyens mis à notre disposition pour la réalisation des deux missions de terrain en République Dominicaine dans le cadre du projet Carthaforum-Radar.
- Des partenaires et collègues de WWF-Goma et Pole Institut (Leopold Rutinigirwa Muliro) en RDC pour leurs accompagnements lors de la mission de terrain dans le parc de Virunga en Juillet et Novembre 2016.
- Des collègues du Laboratoire de Botanique de l'Université de Lomé et Laboratoire International de Gestion de l'Environnement (LGE-Inter) à Lomé au Togo pour leurs accompagnements lors des missions dans la réserve de faune de Togodo et dans la réserve de biosphère de l'OKM au Togo.
- De Madame Sylvie CACH pour son précieux appui administratif.

Merci à ma famille, plus particulièrement à mon épouse, pour son soutien tout au long de cette période de thèse.

A toutes et à tous, merci.

Résumé

Cette étude propose d'explorer les potentialités des données de télédétection optique et radar libres d'accès pour l'évaluation et le suivi des écosystèmes forestiers tropicaux, secs ou humides. Différents sites tests situés dans six écosystèmes forestiers tropicaux ont été sélectionnés :

- République Démocratique du Congo (RDC) : Paysage de Virunga,
- Togo : la réserve de biosphère de l'Oti-Keran-Mandourie (OKM) et la réserve de faune de Togodo (RFT),
- Guyane française : La zone située autour du pont faisant la liaison entre la ville de Saint-Georges de l'Oyapock et la plaine du littoral de Kourou ;
- République Dominicaine : La province de la Monté Cristi.

L'analyse a porté sur l'évolution des ressources naturelles à travers la production des cartographies d'occupation des sols, l'évaluation des ressources forestières par l'inventaires forestiers dans les forêts galeries, la détection et la caractérisation des zones de changement d'occupations du sol et l'analyse diachronique sur les milieux fragiles et vulnérables (forêts et mangroves).

Nous avons utilisé les données de télédétection suivantes : pour les images radar, des séries temporelles Sentinel-1 et des mosaïques Alos-2, pour les images optiques, Sentinel-2 et Landsat-8. D'autres données annexes nous ont également été utiles : cartes d'occupation du sol, points GPS collectés lors des missions de terrain, modèles numériques de terrain (MNT-SRTM de 30m) ainsi que les données d'inventaires forestiers nationaux lorsque ceux-ci étaient disponibles.

Notre approche méthodologique a comporté des prétraitements réalisés sur les images optiques et radar de tous les sites lesquels ont été accompagnés de traitements spécifiques sur chacun des sites. Les images optiques ont donné lieu à une fusion dite ‘‘panchromatique’’ (fusion des bandes les mieux résolues (taille de pixel de 10 m pour Sentinel-2 et 15 m pour Landsat) avec les bandes spectrales moins résolues). Pour les images radar sentinel-1, les étapes successives de prétraitement ont été : l'ortho-rectification basée sur un MNT SRTM, une calibration radiométrique et un filtrage spatio-temporel de Quegan. Les approches spécifiques, variables selon le site d'étude, ont comporté : une photo interprétation détaillée, la classification supervisée SVM, l'inventaire forestier et l'application des équations allométriques, une approche de détection des changements par décomposition en ondelettes, une détection des changements automatiques par seuillage et la caractérisation de ces changements.

Les principaux résultats sont les suivants :

Site du Paysage de Virunga : Réalisation des cartes d'occupation du sol et les cartes binaires forêts, non-forêt de 1987, 1997, 2007 et 2017. Sur la période de 30 ans en utilisant les cartes binaires entre 1987 à 2017 le taux moyen annuel de déforestation est de 1,07%. Ce taux de déforestation montre la pression anthropique croissante sur les ressources forestières dans le paysage des Virunga.

Site de l'OKM et du RFT : une classification menée sur une combinaison d'images optiques et radar donne des performances légèrement meilleures que des classifications menées sur des images optiques et radar considérées séparément. Les cartes d'occupation du sol issues de ces classifications ont servi de base pour l'évaluation des ressources forestières.

Sur le site de Saint-Georges de l'Oyapock, l'analyse temporelle menée à partir de décompositions en ondelettes, a permis de détecter trois grands types de changements dus à la déforestation anthropique, les évolutions saisonnières et les évolutions agricoles.

Sur la plaine littorale de Kourou, une analyse comparative de l'image et des cartes de référence a permis d'identifier, de numériser et d'estimer les dimensions minimales de certaines strates. Pour les petits bosquets en savane, la surface minimale est de 0,04 ha (c'est à dire 2 pixels * 2 pixels).

Sur le site de la province de Monté Cristi en République Dominicaine, l'analyse conjointe d'images radar et optiques a permis de proposer une cartographie comportant 18 classes d'occupation du sol contrôlées sur le terrain avec une précision globale de plus de 90 %. L'analyse diachronique sur les forêts entre 2015 et 2018 montre une régression de la couverture forestière. Parallèlement, nous observons une régression de la surface des mangroves entre 2015 et 2018.

Cette étude a mis en évidence l'immense potentiel des données de télédétection optique et radar pour la caractérisation, la cartographie et le suivi des types d'occupation des sols dans les écosystèmes tropicaux dans différentes régions du monde et en fonction des conditions saisonnières. Si chaque type de données de télédétection possède ses qualités et capacités discriminatoires, cette étude a montré que l'utilisation conjointe et combinée de deux types de données permet d'augmenter significativement la caractérisation et la discrimination des classes d'occupation des sols et ainsi augmenter les chances de fiabilité des actions à mener.

Abstract

This study aims to explore the potential of optical remote sensing and free access radar data for the assessment and monitoring of tropical, dry or wet forest ecosystems. Different test sites located in the following six tropical forest ecosystems were selected:

- Democratic Republic of Congo: Virunga National Park (PNVI)
- Togo: Oti-Keran-Mandourie Biosphere Reserve (OKM) and Togodo Wildlife Reserve (RFT)
- French Guiana: the area around the bridge linking the city of Saint-Georges de l'Oyapock and the plain of the Kourou coast
- Dominican Republic: the province of Monté Cristi

The analysis focused on the evolution of natural resources through the production of land use maps, the assessment of forests ressources in gallery forests, the detection and characterization of zones of changes in land occupation and the temporal monitoring of fragile and vulnerable environments (forests and mangroves).

We used the following remote sensing data: for radar images, Sentinel-1 time series and Alos-2 mosaics, and, for optical images, Sentinel-2 and Landsat-8. Other relevant data were also useful: land cover maps, GPS points collected during field missions, digital terrain models (DTM-SRTM of 30m) as well as national forest inventory data when available.

Our methodology approach included preprocessing performed on the optical and radar images of all sites accompanied by specific treatments on each of the sites. Optical images gave rise to a "panchromatic" fusion (fusion of the best resolved bands (pixel size of 10 m for Sentinel-2 and 15 m for Landsat) with less resolved spectral bands). For sentinel-1 radar images, the successive preprocessing steps were: SRTM DEMT-based ortho-rectification, radiometric calibration, and Quegan spatio-temporal filtering. Specific approaches, varying by study site, included: detailed photo interpretation, supervised SVM classification, forest inventory and application of allometric equations, a wavelet decomposition detection approach, a detection approach automatic changes by thresholding and the characterization of these changes.

The main results are:

PNVI: production of land cover maps and forest, non-forest binary maps for 1987, 1997, 2007 and 2017. Over the 30-year period using the binary maps between 1987 and 2017 the average annual rate of deforestation was found to be 1.07%. This high deforestation rate is directly linked to increasing pressure on forest resources within the Virunga landscape.

OKM and RFT site: a classification carried out on a combination of optical and radar images gives slightly better performances than classifications carried out on optical and radar images considered separately. The land cover maps from these classifications were used as a basis for evaluate the forest resource.

At the Saint-Georges de l'Oyapock site, temporal analysis using wavelet decompositions revealed three main types of changes due to anthropogenic deforestation, seasonal changes and agricultural changes.

At the Kourou littoral plain, a comparative analysis of the image and reference maps made it possible to identify, digitize and estimate the minimum dimensions of certain strata. For small savanna groves, the minimum area is 0.04 ha (ie 2 pixels * 2 pixels).

On the site of the Monté Cristi province in the Dominican Republic, the joint analysis of radar and optical images made it possible to propose a cartography comprising 18 field-controlled land cover classes with an overall accuracy of more than 90%. Historical forest monitoring shows a decline in forest cover. At the same time, we observe a regression of the surface of mangroves between 2015 and 2018.

This study has highlighted the immense potential of optical and radar remote sensing data in the characterization, mapping and monitoring of land use layers in tropical ecosystems in different regions of the world and according to seasonal conditions. While each type of remote sensing data has its own specific discriminatory qualities and capabilities, this study has shown that the joint and combined use of two types of data significantly increases the characterization and discrimination of land-use classes and thus increases the chances of reliability of the actions to be carried out.

Liste des abréviations

AGB: Biomasse Aérienne

ALOS: Advanced Land Observing Satellite

BD : Base de données

BGB : biomasse souterraine

C: Carbone

CCRS: Canada Centre for Remote Sensing

CCT: Centre canadien de télédétection

CNREDD-Togo: Coordination National REDD-Togo

CO_2 : Dioxyde de Carbone

DBH : Diamètre à Hauteur de poitrine (1,30 m)

ECOFOR: Biodiversity and Ecosystem Functioning in Degraded and Recovering Amazonian and Atlantic Forests

ENSG: École nationale des sciences géographiques

ESA: Agence Spatiale Européenne

ETM+: Enhanced Thematic Mapper Plus

EW: Extra-Wide Swath

FA: Forêts Aléatoires

FAO: Food and Agriculture Organization

FAPAR: Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation

FBS: Fine Beam Single

FIT: Front Inter Tropical

GFW: Global Forest Watch

GMWTV: Geometric Multi-Wavelet Total Variation

GPS: Global Positioning System

GRD: Ground Range Detected

H_2O: Molécule d'eau

IGN : Institut Géographique National

IPPC: International Plant Protection Convention

IRD: Institut de recherche pour le développement

ITK: The Insight Toolkit

ITS: Iterative Time Serie

IW: Interferometric Wide Swath

JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency

LAI: Leaf Area Index

LET: Laboratoire d'Ecologie Tropicale

LIDAR: Light Detection and Ranging

LISTIC : Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance

MCARI : Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index

MDDM : Multi-Date Divergence Matrice

MECNT: Ministère de l'Environnement de la Conservation de la Nature et du Tourisme

MERF: Ministère de l'Environnement et des ressources forestières

MIR: Moyen Infra Rouge

MNT: Modèle Numérique de Terrain

MSI: Multi Spectral Instrument

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

O: Oxygène

OA: Overall Accuracy

OKM: Réserve de biosphère d'Oti – Keran – Mandourie

OLI: Operational Land Imager

ONF: Office Nationale des Forêt

ONFI: ONF – International

OSW: Ocean Swell spectra

OTB: Orefeo Toolbox

OWI: Ocean Wind field

PA: Producer's Accuracy

PALSAR: Phased Array L-band SAR

PIR: Proche Infra Rouge

PNVi : Parc National des Virunga

QGIS: Quantum GIS

RADAR: Radio Detection and Ranging

RAMSAR: Convention relative aux zones humides d'importance internationale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau

RDC: République Démocratique du Congo

REDD+: Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation plus

RF : Random Forest

RFT : Réserve de Faune de Togodo

ROI : Régions d'intérêts

RVL: Surface Radial Velocity

SAR: Synthetic Aperture Radar

SIG : Système d'Information Géographique

SLC: Single Look Complex

SM: Strip Map

SNAP: Sentinel Application Platform

SPOT: Système Pour l'Observation de la Terre

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

SVM: Support Vector Machine

TIRS: Thermal Infrared Sensor

THR: Très Haute Résolution

TM: Thematique mappeur

UA: User's Accuracy

UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture

UPEM: Université Paris-Est-Marne-la-Vallée

UTM: Universal Transverse Mercator

WB: PALSAR ScanSAR short bursts mode

WGS: World Geodetic System

WTV: Wavelet Total Variation.

WV: Wave

Liste de Tableaux

Tableau 1 : Typologie des écosystèmes forestiers (Holdridge, 1947 ; ECOFOR, 2014) 31
Tableau 2: Bandes radar, plages de fréquences et de longueurs d'onde (CCT, 1980) 40
Tableau 3: Caractéristiques et informations techniques sur les satellites LANDSAT 1 – 8 (www.landsat.usgs.gov/landsat-8) 52
Tableau 4: Caractéristiques des satellites Sentinel-2A et 2B (www.sentinel2.cnes.fr) 54
Tableau 5:Comparaison des satellites Sentinel-2 (ESA) et Landsat 8 (NASA / USGS). (www.regard-sur-la-terre.over-blog.com/tag/meteorologie) 54
Tableau 6: Les Caractéristiques du capteur ALOS/PALSAR (http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/obs/overview.htm) 56
Tableau 7: Les Caractéristiques du capteur ALOS/PALSAR -2 (http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/about/palsar2.htm) 57
Tableau 8: Caractéristiques de mode d'acquisition des images sentinel-1 (1A/1B) (https://sentinel.esa.int) 59
Tableau 9: Exemple d'une matrice de confusion 112
Tableau 10: Résultats numériques de PA, UA, OA, F-Score appliqué à la matrice de confusion du tableau 19 114
Tableau 11: Description des classes d'occupation des sols dans le paysage des Virunga (WWF-Goma, 2014) 126
Tableau 12 : Valeur moyenne de la radiometrique des bandes de Landsat par classe d'occupation du sol 126
Tableau 13: Matrice de confusion de la classification d'image de 1987 129
Tableau 14: Répartition des classes d'occupation du sol du paysage des Virunga en 1987 129
Tableau 15: Matrice de confusion de la classification d'image de 1997 130
Tableau 16: Répartition surfacique des classes d'occupation du sol du paysage des Virunga en 1997 130
Tableau 17: Matrice de confusion de la classification d'image de 2007 132
Tableau 18:Répartition surfacique des classes d'occupation du sol du paysage des Virunga en 2007 132
Tableau 19: Matrice de confusion de la classification d'image de 2017 134
Tableau 20: Répartition surfacique des classes d'occupation du sol du paysage des Virunga en 2017 137
Tableau 21: Répartition des surfaces forêts /Non Forêt sur le paysage des Virunga en 1987, 1997, 2007 et 2017 137
Tableau 22: Taux de déforestation annuel suivant les périodes. 145
Tableau 23: Analyse de la déforestation à l'intérieur et hors du parc de PNVi 146
Tableau 24:définition des classes d'occupation des sols identifiées au Togo 150
Tableau 25: Illustration des classes d'occupation du sol sur les images Sentinel-1 et Sentinel-2 rendant compte de leur séparabilité visuelle 152
Tableau 26: Matrice de confusion de la classification des images Sentinel-2 sur le site de l'OKM en saison sèche 154
Tableau 27: Matrice de confusion de la classification des images Sentinel-1 sur le site de l'OKM en saison sèche 156
Tableau 28: Matrice de confusion de la classification de la combinaison des images Sentinel-1 et sentinel-2 sur le site de l'OKM en saison sèche 158
Tableau 29:Matrice de confusion de la classification des images Sentinel-1 sur le site de l'OKM en saison pluvieuse 160
Tableau 30: Processus de post-traitement pour l'obtention de la carte d'occupation des sols de la réserve de biosphère de l'OKM 162
Tableau 31: surface et proportions des classes d'occupation des sols de la réserve de biosphère de l'OKM 163

Tableau 32: les essences forestières et leurs caractéristiques dendrométriques moyennes à l'hectare 165
Tableau 33: Récapitulation des données d'inventaires de la réserve de biosphère de l'OKM 168
Tableau 34: Matrice de confusion de la classification des images Sentinel-1 de la zone de la RFT en saison sèche 169
Tableau 35: Matrice de confusion de la classification de la combinaison des images Sentinel-1et Alos-2 de la zone de RFT en saison sèche 172
Tableau 36: Matrice de confusion de la classification des images Sentinel-1 de la zone de RFT en saison des pluies 174
Tableau 37: Matrice de confusion de la classification de la combinaison des images Sentinel-1 et Alos-2 de la zone de RFT en saison des pluies 176
Tableau 38: Processus de post-traitement pour l'obtention de ma carte d'occupation des sols de la RFT 178
Tableau 39: Proportions des classes d'occupation des sols de la zone de RFT 178
Tableau 40: Les essences forestières et leurs caractéristiques dendrométriques moyennes à l'hectare dans la RFT 180
Tableau 41: Récapitulation des données d'inventaires de la RFT..... 183
Tableau 42: Coordonnées (Latitude- Longitude) des sites à comportements suspicieux de la GMWTV. Le Rayon ROI est donné en pixels, la taille du pixel est d'environ 150m^2 186
Tableau 56 : Analyse des profils VV et VH de la série temporelle d'image S-1 pour les 4 cas de types de changements observés 192
Tableau 44: Les Classes d'occupation des sols identifiées lors de la mission de terrain..... 213
Tableau 45: Matrice de confusion de la classification sur Sentinel-2 219
Tableau 46: Matrice de confusion de la classification sur 43 scènes Sentinel-1 (2015-2018)..... 222
Tableau 47: Matrice de confusion de la classification sur 43 scènes Sentinel-1+ Sentinel-2 225
Tableau 48: Synthèse des statistiques de classification avec le calcul du F-Score..... 226
Tableau 49: Différence entre les F-scores de la classification Sentinel-2 et Sentinel-1..... 226
Tableau 50: Analyse de F-scores de la fusion Sentinel-1/Sentinel-2 par rapport au deux capteurs séparées 227
Tableau 51: Zone de changement dans les écosystèmes humides à Monté Cristi..... 229
Tableau 52: Liste et date des images utilisées sur le site du paysage des Virunga 239
Tableau 53: Liste et dates des scènes utilisées 239
Tableau 54: Liste des images Sentinel-1 pour la cartographie l'OKM..... 239
Tableau 55: Liste des images Sentinel-1 pour la cartographie d'occupation du sol de la RFT 241
Tableau 56: Images PALSAR 2 disponible et exploitable sur le site de RFT (Sud Togo) 242
Tableau 57 : Images Pléiades utilisée sur le site de la plane de Kourou 242
Tableau 58: Images Sentinel-1 utilisées sur le site de la plaine littorale de Kourou 243
Tableau 59: Images Sentinel-1 utilisées sur le site de Saint-Georges de l'Oyapock..... 243
Tableau 60: Liste et dates des scènes utilisées 245
Tableau 61: Images Sentinel-1 utilisées sur le site de la province de Monté Cristi 246

Liste de Figures

Figure 1 : Répartition de la forêt (Km^2) suivant les régions du monde (source FAO, 2015). 29
Figure 2 : Répartition des forêts feuillus/résineux (ONF, 2010) 29
Figure 3: Caractéristiques des forêts du monde (source FAO, 2010) 30
Figure 4: Typologie des écosystèmes forestiers au niveau mondial (Source : Schnell, 1971). 31
Figure 5: Schématisation de la photosynthèse et de la respiration au niveau d'une feuille (Köppen, 1936) 32
Figure 6 : Fonctionnement du domaine actif et passif en télédétection (E : Rayonnement incident/émis, T : Transmis, A : Absorbé, D : Diffusé, R : Réfléchi) 35
Figure 7: Double interaction du rayonnement solaire avec l'atmosphère (www.e-cours.univ-paris1.fr/modules) 36
Figure 8:Signature spectrale de l'eau, du sol nu et de la végétation dans différentes longueurs d'ondes (www.seos-project.eu/modules). 37
Figure 9: Schématisation des effets du relief : Le point **B** est localisé comme s'il était en **C** dans le plan de référence : il s'agit d'effet de parallaxe. 38
Figure 10: Géométrie d'acquisition radar (Olmsted, 1993) 40
Figure 11: Polarisation horizontale (H) et verticale (V) du signal Radar (CCT, 1980) 41
Figure 12: polarisation croisée HV ou VH (CCT, 1980) 41
Figure 13: Représentation de la résolution radiale. 43
Figure 14:Construction d'une image radar en utilisant le déplacement du capteur (Ulaby al, 1987) 43
Figure 15: Les déformations géométriques sur les images radar (CCRS, 2001) 46
Figure 16: Image Sentinel-1 originelle (a), et après application du filtre de Quegan (b), extrait sur le site de Monté Cristi 47
Figure 17: Mécanisme de rétrodiffusion de l'onde électromagnétique du couvert forestier (Thiel, 2011) 50
Figure 18:Capacité de pénétration du signal radar dans le couvert forestier en fonction de la fréquence du signal (Nicolini, 1997). 51
Figure 19: Mode d'acquisition et d'observation du capteur ALOS/PALSAR-1 56
Figure 20:Mode d'acquisition et d'observation du capteur ALOS/PALSAR-2 57
Figure 21: Les différents modes d'observation des satellites sentinel-1 (1A et 1B) (https://dipankar005.wordpress.com/2016/02/07/sar-data-selection-and-differrent-sar-satellites/) 59
Figure 22:Localisation de l'écosystème du paysage de Virunga 67
Figure 23: Courbe ombrothermique de la station de Goma (Source : station météorologique de Goma et https://fr.climate-data.org/location/1074). Les données sont collectées sur une durée de 30 ans pour la construction de cette courbe ombrothermique. 68
Figure 24: Représentation du relief du paysage du paysage des Virunga (élaborée par Kemavo) 69
Figure 25: Emprise des extraits d'images optiques (Sentinel-2 et Landsat) sur la zone du Paysage des Virunga 73
Figure 26:Localisation de la réserve de biosphère du complexe de l'OKM 74
Figure 27: Courbes Ombro-thermiques de la station de Kanté (Source : Direction de la météorologie nationale de Kanté au Togo, les données sont collectées sur la station de Kanté sur une durée de 30 ans) 75
Figure 28: Courbes Ombro-thermiques de la station de Mango (Source : Direction de la météorologie nationale de Mango au Togo, les données sont collectées sur la station de Mango sur une durée de 30 ans) 76
Figure 29:Représentation du relief de l'OKM (élaborée par Kemavo) 77
Figure 30:Emprise des images sentinel-1 et 2 sur le site d'OKM 79
Figure 31: Localisation de la réserve de faune de Togodo 80

Figure 32: Courbe Ombrothermique au sens de Gaussen de la station de Tabligbo (Source : station météorologique de Tabligbo préfecture de Yoto (juillet 2011), les données sont collectées sur cette station sur une durée de 30 ans) 82
Figure 33:Représentation du relief de l'RFT (élaborée par Kemavo) 83
Figure 34: Emprise d'extrait des images sentinel-1 et Alos-2 sur le site de RFT au Sud-Togo (Emprise differente pour les deux images) 85
Figure 35: Localisation du site test de Kourou 86
Figure 36: Courbe Ombrothermique sur le site de Kourou (https://fr.climate-data.org/location/410985/, les données sont collectées sur la station de kourou sur une durée de 30 ans) 87
Figure 37: Représentation du relief du site de Kourou (élaborée par Kemavo) 88
Figure 38: Emprise des images Sentinel-1 et Pléiade sur le site de la plaine du littorale de Kourou 90
Figure 39: Localisation du site test de Saint-Georges de l'Oyapock 91
Figure 40:Courbe Ombrothermique du site de Saint Georges de l'Oyapock (https://fr.climate-data.org/location/410985/, les données sont collectées sur cette station sur une durée de 30 ans) 92
Figure 41: Représentation du relief de la zone de Saint-Georges de l'Oyapock (élaborée par Kemavo). 92
Figure 42: Emprise des images Sentinel-1 sur le site de Saint-Georges de l'Oyapock 93
Figure 43: Localisation de la province de Monté Cristi 95
Figure 44: Carte des isohyètes de la république dominicaine (source : atlas - ministere de l'environnement et des ressources naturelles – republique dominicaine, 2012). 95
Figure 45: Courbe Ombrothermique du site de la province de Monté-Cristi en République Dominicaine, https://fr.climate-data.org/location/2997/, les données sont collectées sur une durée de 30 ans. 96
Figure 46: Carte des altitudes de la République Dominicaine (source : atlas - ministère de l'environnement et des ressources naturelles – Republique Dominicaine, 2012). 97
Figure 47: carte des cours d'eau de la République Dominicaine (source : atlas - ministère de l'environnement et des ressources naturelles – Republique Dominicaine, 2012). 98
Figure 48: Illustration comparative des bandes d'image Landsat-8 brute et les bandes d'image landsat-8 après le pansharpening sur la zone de Saint-Domingue 102
Figure 49: Illustration comparative des bandes d'image Sentinel-2 et les bandes d'image Sentinel-2 après le pansharpening sur la zone de Saint-Domingue 103
Figure 50: Schématisation des étapes de traitements réalisés sur les images Sentinel-1 104
Figure 51: Illustration d'image Sentinel-1 en orbite montante sur la ville de Cayenne et Guyane sans et avec correction géométrique (inversion Nord-Sud plus une rotation de 12°) (ENSG, 2014). 105
Figure 52: Illustration de la bande VH en décibel d'une image Sentinel-1 sur la zone de Monté Cristi en République Dominicaine 107
Figure 53: Résultat de l'application du filtre de Quegan sur la bande VH en décibel de 43 images (43 dates) Sentinel-1 sur le site de Monté Cristi en République Dominicaine. L'image filtrée est celle acquise à la date du 04/07/2017 107
Figure 54: Illustration de la bande VV en décibel d'une image Sentinel-1 sur la zone de Monté Cristi en République Dominicaine 108
Figure 55: Résultat de l'application du filtre de Quegan sur la bande VV en décibel de 43 images (43 dates) Sentinel-1 sur le site de Monté Cristi en République Dominicaine. L'image filtrée est celle acquise à la date du 04/07/2017 108
Figure 56: Illustration de la composition colorée d'une image Sentinel-1en decibel du 10 - 06 - 2017 sur le site de Monte-Cristo 109
Figure 57: Exemple de fonctionnement du SVM dans le cas linéaire. Dans ce cas, 4 vecteurs de support (points) sont nécessaires pour définir l'hyperplan optimal 111
Figure 58: Exemple de placette carrée d'inventaire avec 25 m de côté 120
Figure 59: Instruments de mesures lors des inventaires forestiers (Ruban forestier et) 120

Figure 60: valeurs radiométriques des bandes spectrales d'une image Landsat-5 par classes d'occupation du sol 127
Figure 61: Carte d'occupation du sol du paysage des Virunga en 1987 128
Figure 62: Carte d'occupation du sol du paysage des Virunga en 1997 131
Figure 63:Carte d'occupation du sol du paysage des Virunga en 2007 133
Figure 64: Photographies lors de mission de terrain dans le parc national des Virunga en Mai 2017 (Mission Kemavo) 135
Figure 65: Carte d'occupation du sol du paysage des Virunga en 2017 136
Figure 66:Cartographie binaire forêt/Non Forêt pour l'année 1987, 1997, 2007, 2017 138
Figure 67:Carte de déforestation du paysage des Virunga entre 1987-1997 139
Figure 68: Carte de déforestation du paysage des Virunga entre 1997-2007 140
Figure 69:Carte de déforestation du paysage des Virunga entre 2007-2017 141
Figure 70:Carte de déforestation du paysage des Virunga entre 1987-2017 142
Figure 71: Déforestation et période des grands conflits dans le paysage des Virunga 144
Figure 72: Taux de pertes du couvert forestier suivant les périodes 146
Figure 73: Evolution de la déforestation en ha à l'interieur et à l'exterieur du PNVi 147
Figure 74: Etape de la réalisation des classifications 151
Figure 75: Profil temporel des classes d'occupation du sol sur la polarisation VV en décibel des images Sentinel-1 151
Figure 76:Profil temporel des classes d'occupation du sol sur la polarisation VH en décibel des images Sentinel-1 152
Figure 77:Carte d'occupation des sols de la réserve de l'OKM en saison sèche (Classification des images Sentinel-2). 155
Figure 78: Carte d'occupation des sols de la réserve de l'OKM en saison sèche (par Classification des images Sentinel-1) 157
Figure 79:Carte d'occupation des sols de la réserve de l'OKM en saison sèche avec Sentinel-1 et Sentinel-2 159
Figure 80: Carte d'occupation des sols de la réserve de l'OKM en saison pluvieuse 161
Figure 81:Carte d'occupation des sols de la réserve de biosphère de l'OKM en 2017 163
Figure 82: Répartition des classes d'occupation du sol dans la réserve de biosphère de l'OKM en 2017 164
Figure 83: Photographies lors de mission de terrain dans la réserve de biosphère de l'OKM en Juin 2018 (Mission Kemavo) 167
Figure 84: Carte d'occupation de la RFT en saison sèche avec des images Sentinel-1 170
Figure 85: Carte d'occupation de la RFT en saison sèche avec la combinaison d'image Sentinel-1 et Alos-2 173
Figure 86:Carte d'occupation de la RFT en saison des pluies avec les images Sentinel-1 175
Figure 87:Carte d'occupation de la RFT en saison des pluies avec la combinaison d'image Sentinel-1 et Alos-2 177
Figure 88: Carte finale d'occupation du sol de la zone de RFT en 2017 179
Figure 89: Photographies lors de mission de terrain dans la réserve de faune de Togodo en Juin 2018 (Mission Kemavo) 182
Figure 90: Sous-sélection d'image montrant 12 Région d'Intérêt parmi les 13 étudiées ou il y a des comportements suspicieux de la GMWTV (voir tableau 52). Image Sentinel-1A 187
Figure 91:Diagramme de l'analyse ITS. Les WTV sont calculés au niveau des pixels sur de vastes zones spatiales. Les régions à grand WTV sont ensuite analysées par MDDM (niveaux de sous-image / patch). 188
Figure 92: 128 × 128 sous-sélections de WTV Θ •, 87 et GMWTV Θ87 autour des zones présentant des comportements anormaux présentées dans le tableau 52. 189
Figure 93: Illustration de zone de changement détecté par la métode de décomposition enondellette. Les zones en Bleu sont les zones où il y a eu un changement entre 2015-05-12 et 2017-12-03 190

Figure 94: MDDM K pour les zones présentant des comportements suspects données par le tableau 54 et pour le site de test. 191
Figure 95: Illustration de la moyenne temporelle d'image Sentinel-1 (2017-01-01:2017-12-03); (Composition colorée **Rouge=VVdB** ; **Vert =VHdB**; Bleu= VHdB-VVdB) 204
Figure 96: Résultat de la classification SVM sur une moyenne 53 scènes Sentinel-1 en bande C. Les résultats de la classification ont été tamisés à 0,5ha. 204
Figure 97: Carte de références du laboratoire de l'Ecologie terrestre en 1995 au 1/50000 205
Figure 98: Résultat de la classification SVM sur une moyenne 53 scènes Sentinel-1 en bande C. Les résultats de la classification ont été tamisés à 0,5ha. 205
Figure 99: illustrant la route, la forêt et la savane sur Sentinel-1 (composition colorée Rouge = db(VV), Vert V = db(VH), Bleu = db(VH)-db(VV) 210
Figure 100: Valeurs radiométriques moyennes des ROI des classes d'occupations du sol pour chaque bande Sentinel-2 216
Figure 101: Moyenne des valeurs radiométriques des bandes VV, VH et de la différence VH, VV en decibel d'image sentinel-1 pour chaque classe d'occupation du sol sur le site de Monté Cristi 216
Figure 102: illustration de l'image Sentinel-2 utilisée pour la classification 217
Figure 103: Cartographie d'occupation des sols de la zone de Monté Cristi obtenue par classification SVM à partir Sentinel-2A 217
Figure 104: Illustration d'une image S-1 filtré ayant servis à la classification 220
Figure 105: Cartographie d'occupation des sols de la zone de Monté Cristi obtenu par classification SVM à partir de 43 scènes S-1 220
Figure 106: Cartographie d'occupation des sols de la zone de Monté Cristi obtenue par classification SVM des 43 scènes S-1+ S2. 223
Figure 107: illustration en plaine résolution de l'image Setinel-2 224
Figure 108: Illustration de la classification sur l'image Sentinel-2 en résolution initiale 224
Figure 109: Carte binaire écosystèmes humides / écosystèmes non humides de la province de Monté Cristi établie à partir de regroupement evoqué précedement 228
Figure 110: Cartographie de changement dans les écosystèmes humides entre 2015 et 2018 229
Figure 111: Cartographie binaire Forêts / Non Forêts de la province de Monté Cristi 230
Figure 112: Carte de déforestation de la province de Monté Cristi entre 2015-2018 231

Table des matières

Dédicace 2
Remerciements 3
Résumé 5
Abstract 7
Liste des abréviations 9
Liste de Tableaux 12
Liste de Figures 14
Table des matières 18
Introduction générale 21
Chapitre I : Généralités sur les écosystèmes forestiers, la télédétection et état de l'Art. 27
Introduction 28
I I. Généralité sur les écosystèmes forêts 28
I I.1 Définition 28
I I.2 Typologie des écosystèmes forestiers 30
I I.3 Rôles des écosystèmes forestiers sur le plan climatique 32
I I.4 Rôle des forêts dans le stock global du carbone 32
I II. Généralités sur la télédétection 34
I II.1 Introduction 34
I II.2 Télédétection optique et radar 35
I II.3 Description des capteurs optiques et radar utilisés 51
III. Etat de l'Art de la télédétection optique et radar 60
I III.1 Etat de l'art sur l'utilisation des données de télédétection optique pour l'étude des écosystèmes forestiers 60
III.2 Etat de l'art sur l'utilisation des données de télédétection RADAR pour l'étude des écosystèmes forestiers 62
Chapitre II : Descriptions des sites d'étude et données utilisées 65
Introduction 66
I. Écosystème du Paysage des Virunga 66
I.1. Localisation géographique 66
I.2. Caractéristiques physiques 68
I.3. Diversité biologique du paysage de Virunga 70
I.4. Problématiques traitées et données utilisées 72
II. Réserve de biosphère du Complexe d'Oti – Keran – Mandourie (OKM) au Togo 73
II.1. localisation géographique 73
II.2. Caractéristiques physiques 74
II.3. Diversité biologique du complexe de l'OKM 78
II.4. Problématiques traitées et Données utilisées 78
III. Réserve de faune de Togodo (RFT) au Togo 80
III.1. Localisation géographique 80
III.2. Caractéristiques physiques 81
III.3. Diversité biologique de la RFT 84
III.4. Problématiques traitées et Données utilisées 85
IV. Littoral de la plaine de Kourou en Guyane française 86
IV.1. Localisation géographique 86
IV.2. Caractéristiques physiques 87
IV.3. Diversité biologique de la Guyane Française 89
IV.4. Problématiques traitées et données utilisées 89
V. La a zone frontière de Saint-Georges de l'Oyapock de française 91
V.1. Localisation géographique 91
V.2. Caractéristiques physiques 91
V.3. Diversité biologique du site de Saint-Georges de l'Oyapock 93
V.4. Problématiques traitées et données utilisées 93
VI- Les forêts tropicales sèches de la Caraïbe : Cas de la province de *Monté Cristi* en République Dominicaine 94
VI.1. Localisation géographique 94
VI.2. Caractéristiques physiques 95

VI.3. Diversité biologique de la province de Monté-Cristi 98
VI.4. Problématiques traitées et données utilisées..... 99
Chapitre III : Approches méthodologiques utilisées sur les différents sites tests..... 100
Introduction 101
I. Les aspects généraux de prétraitements des images satellitaires 101
I.1. Prétraitement des données optiques 101
I.2. Prétraitement des données radar..... 104
II. Traitement d'extraction d'information : Méthode de classification pour la production de carte d'occupation du sol..... 110
II.1. Analyse de la séparabilité des classes..... 110
II.2. Classification par Séparateurs à Vaste Marge (SVM) 111
II.3. Méthode de validation des résultats de la classification 112
III. Détection des changements 115
III.1. Détection de la déforestation par la méthode développée par Lardeux et al, 2018. 115
III.2. Détection des changements par la méthode des ondelettes. 117
IV. Méthode d'inventaire des ressources forestières 119
V. Les outils logiciels utilisés..... 121
Chapitre IV : Analyse diachronique de l'impact des conflits armés sur l'évolution de l'occupation des sols dans le Paysage des Virunga autour du Parc National des Virunga (PNVi) en RDC. (Période de 1987 à 2017) ;..... 124
Introduction 125
I. L'analyse visuelle et la sélection des classes d'occupation des sols 125
II. Résultats des classifications et production des cartes d'occupation du sol 127
II.1. Etat du paysage des Virunga en 1987..... 127
II.2. Etat du paysage des Virunga en 1997..... 130
II.3. Etat du paysage des Virunga en 2007..... 132
II.4. Etat du paysage des Virunga en 2017..... 134
III. Analyse de la déforestation entre 1987-2017 137
III.1. Déforestation en 1987-1997 139
III.2. Déforestation en 1997-2007 140
III.3. Déforestation en 2007-2017 141
III.4. Déforestation en 1987-2017 142
IV. Discussion des résultats..... 143
Chapitre V : Évaluation des ressources forestières des aires protégées du Togo : Cas de la réserve de biosphère d'Oti – Keran – Mandourie (OKM) et de la réserve de faune de Togodo (RFT). 148
Introduction 149
I. Définition des classes occupation des sols 149
II. La réserve de biosphère de l'Oti-Keran-Mandourie (OKM)..... 154
II.1 Production de carte d'occupation des sols de 2017 154
II.2. Inventaire forestier de la réserve de biosphère d'OKM..... 165
III. Cas de la réserve de RFT..... 169
III.1 Production de la carte d'occupation des sols de 2017 169
III.2 Résultat de l'inventaire forestier..... 180
IV. Conclusion et incertitude..... 184
Chapitre VI : Etude de cas en Guyane : la plaine littorale de Kourou et la zone frontière de Saint Georges de l'Oyapock..... 185
II.1. Les critères d'interprétation et de discrimination des classes d'occupation de sol. 185
II.2. Caractéristiques des strates d'occupation des sols Définition des classes d'occupation du sol 185
II.3. Démarche d'analyse et d'interprétation : 185
II.4. Conclusion 185
I. Application de la décomposition en ondelettes pour la détection et la caractérisation des changements dans la zone située autour du pont reliant Saint-Georges de l'Oyapock et l'état d'Amapa au Brésil. 186
I.1. Introduction..... 186
I.2. Sites expérimentaux 186
I.3.Résultats..... 188
I.4. Conclusions..... 196

II. Caractérisation détaillée des classes d'occupation du sol sur la plaine littorale de Kourou... 197
II.1. Les critères d'interprétation et de discrimination des classes d'occupation de sol. 197
II.2. Caractéristiques des strates d'occupation des sols Définition des classes d'occupation du sol 198
II.3. Démarche d'analyse et d'interprétation : 204
II.4. Conclusion : 211
Chapitre VII : Suivi des écosystèmes fragiles et vulnérables aux changements climatiques de la province de Monte Cristi en République Dominicaine. 212
Introduction 213
I. Analyse du paysage et identification des strates d'occupation de la province de Monte Cristi lors de mission de terrain 213
II. Cartographie d'occupation des sols 217
II.1. Analyse d'image optique – Sentinel-2 217
II.2. Analyse d'image radar – Sentinel-1 220
II.4. Discussion des résultats statistiques 226
III. Analyse historique des écosystèmes fragiles et vulnérables 228
III.1. Analyse historique relative aux écosystèmes humides 228
III.2. Analyse historique relative à l'écosystème des forêts 230
IV. Conclusion 232
Conclusions – Recommandations - Perspectives 233
Conclusion Générale: 233
Recommandations 235
Perspectives 237
Annexes : Liste des images utilisées 239
Références bibliographiques : 247
Webographie: 257

Introduction générale

Les écosystèmes terrestres et marins jouent un rôle de premier ordre dans la régulation du climat. Ils absorbent la majorité des émissions de dioxyde de carbone (CO_2) et autres gaz dans l'atmosphère. Les écosystèmes forestiers jouent un rôle clé dans la vie quotidienne et l'environnement immédiat des hommes (Thapa et al, 2014). Les écosystèmes forestiers offrent une gamme variée de biens et services indispensables à la survie et à l'équilibre des écosystèmes et des populations sont concernées et sont au cœur des enjeux écologiques et économiques. D'après les études menées par la FAO sur l'évaluation des ressources forestières mondiales, leur couverture en 2015 est de 40 millions de km² soit 30,6% des terres émergées (FAO, 2015). Ce sont des milieux riches en biodiversités. Ils occupent ainsi une place primordiale dans les cycles biogéochimiques globaux (Guitet, 2015) et interviennent dans la régulation du cycle hydrique, d'azote, d'oxygène et de carbone à travers la respiration des plantes et la photosynthèse.

Depuis quelques décennies, les écosystèmes forestiers sont au centre des enjeux internationaux sur les changements climatiques. Ces derniers se sont imposés dans le débat international car les effets sont à même de compromettre la survie de l'humanité tout entière. C'est depuis le premier colloque mondial sur les questions environnementales à Stockholm en 1972 que la communauté internationale tente de trouver des solutions à cette situation. De la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et le protocole de Kyoto adoptés respectivement en 1992 et en 1997 à l'accord sur les changements climatiques en 2015 à Paris, la prise en compte du rôle des forêts dans les stratégies de lutte contre le changement climatique et le réchauffement global n'a cessé de croître (GIEC, 2016).

Parmi les écosystèmes forestiers, les forêts tropicales constituent des réservoirs exceptionnels de conservation de la biodiversité. Elles représentent environ 46% de la surface globale des forêts (Ciais et al, 2014). Elles fournissent des services écologiques essentiels au niveau régional et global. Elles remplissent des fonctions sociales et culturelles essentielles aux populations locales et autochtones. La population locale à travers les activités de cueillette et de chasse utilise les forêts pour la satisfaction des besoins alimentaires. Elles constituent la principale source de médicaments, de matériaux de construction pour les populations aussi bien rurales qu'urbaines. Les forêts d'Afrique centrale par exemple offrent des moyens de subsistance à plus de 60 millions de personnes qui y vivent ou résident à proximité (Marquant, 2015). Indirectement, elles contribuent à l'alimentation des 40 millions de personnes qui vivent dans les centres urbains proches de ces massifs forestiers (Nasi et al, 2011 ; De Wasseige et al, 2014).

Les écosystèmes forestiers tropicaux restent confrontés à plusieurs facteurs résultant le plus souvent des activités humaines. Il s'agit, entre autres, de l'exploitation non raisonnée des ressources en bois, des ressources minérales, la conversion des terrains forestiers en parcelles agricoles, l'agriculture sur brûlis, l'expansion des zones d'habitation, les conflits armés, les crises socio-politiques et dans certaines sous-régions la faible gouvernance forestière ou environnementale. Dans le cas spécifique des conflits armés, les écosystèmes forestiers constituent le plus souvent des refuges pour les réfugiés, les déplacés de guerres ou même les hommes armés. Les forêts se retrouvent donc au premier plan des zones sacrifiées lors des conflits. (EUROFOR, 1994 ; Malhi et Grace, 2000). Afin d'assurer la pérennité du couvert forestier (pour que les forêts continuent de jouer leur rôle indispensable pour l'humanité) et réduire leur disparition, des actions globales et concertées doivent être entreprises.

La gestion rationnelle et durable des forêts (*mode de gestion forestière à tendance écologique; qui fixe des critères, indicateurs1 et objectifs sociaux et environnementaux, en plus des objectifs économiques à la gestion forestière*) a été décrite par les différentes conventions internationales sur l'environnement, et plus récemment par l'accord de Paris sur les changements climatiques, comme l'une des stratégies possibles pour réduire la perte de couverture forestière au niveau mondial. La gestion durable ou l'aménagement écosystémique des forêts donne des critères, indicateurs et objectifs sociaux, environnementaux et économiques à l'écosystème forestier. Elle vise le maintien ou une gestion restauratrice de la biodiversité. Ainsi l'objectif de la gestion rationnelle des forêts est de garantir la production des biens et services tout en maintenant l'étendue des forêts et ses caractéristiques structurelles et écologiques à de multiples échelles. La gestion rationnelle des forêts, lorsqu'elle est appliquée à la production de bois d'œuvre, permet de maximiser le rendement en bois durable, à savoir tenter de générer comme constant et prévisible un flux du bois dans un volume aussi élevé que les potentialités des forêts le permettront. L'aménagement forestier, à travers, entre autres, la régénération du couvert à la suite de l'exploitation forestière, la vulgarisation des méthodes d'exploitation forestière à impact réduit et le développement de certifications légales ou durables des concessions, limite la dégradation des surfaces et donc la déforestation. Ainsi une gestion forestière organisée à l'échelle continentale, régionale, nationale ou locale aiderait sans doute à réduire la perte de couvert forestier et donc de garantir la poursuite de ces services écosystémiques (Dixon, 1994 ; FAO, 1997).

Pour une gestion rationnelle des ressources forestières, la connaissance de l'historique du couvert, son contenu, sa composition, son évolution dans le temps et dans l'espace et son suivi s'avèrent indispensables. Le but de la surveillance des forêts est de fournir en temps opportun des informations fiables sur leurs compositions, leurs états et étendus, comme une base pour la

prise de décisions claires pour la gestion de ces ressources et la planification future des interventions. Pour obtenir ces informations indispensables à la mise en place d'une stratégie de sauvegarde et de conservation, il existe plusieurs approches et méthodes. Le choix de la méthode dépend de la stratégie de collecte des données, du type de variable, de la précision souhaitée. Les relations qui existent entre une variable, sa provenance et les méthodes utilisées pour sa collecte peuvent aider à choisir la méthode appropriée. Les principales méthodes de collecte sont, entre autre, les observations directes de terrain, les enregistrements des essences inventoriées, les questionnaires de relevées socioeconomique (FAO, 1999). Ces méthodes de collecte sont adaptées à des surfaces réduites et des zones accessibles. Elles sont plus difficiles à mettre en place sur des surfaces plus vastes et s'avèrent très coûteuses à petite échelle.

La disponibilité d'informations de qualité sur les écosystèmes forestiers (au niveau national, régional ou local) est primordiale pour la mise en place d'une stratégie de gestion efficace ou de gestion durable des ressources forestières. Ces informations manquent dans beaucoup de pays, et cela, surtout pour les pays en développement où les questions environnementales et forestières sont reléguées au second rang des priorités nationales. Face au manque d'informations précises sur les ressources forestières et au manque de références communes dans les mesures, une gestion coordonnée mondiale ou régionale reste pour l'instant quasi impossible (Proisy, 1999). Aussi, les chiffres sur la perte et le gain de surface des forêts restent approximatifs dans certaines régions du monde et cela, comme mentionné précédemment, surtout dans les pays en développement. Il en est de même pour la reconnaissance et la détection la plus précise possible des types de végétation, d'occupation du sol, pour la définition et la détection des changements qui interviennent au niveau des états de surfaces.

Cependant depuis plusieurs années, du fait d'une perception accrue des effets négatifs du changement climatique plusieurs initiatives ont été engagées, aussi bien pour la collecte des données de qualité que pour le suivi des écosystèmes forestiers au niveau mondial avec les nouvelles technologies spatiales. Ainsi pour l'analyse des phénomènes historiques sur les écosystèmes et la surveillance future de vastes espaces il sera donc nécessaire de pouvoir estimer les ressources et de proposer des plans de gestion sur de larges surfaces, grâce à des outils robustes et peu coûteux (Gond et al, 2003). Dans ce cadre, les sciences spatiales apparaissent comme un moyen opérationnel pour collecter efficacement ce type d'informations (De Wasseige 1999).

Les technologies de spatialisation (Télédétection, Systèmes d'Information Géographique (SIG) et le positionnement par satellite) se présentent comme un des moyens indispensables pour la collecte des données pour la gestion et l'aménagement sur de vastes espaces. En effet ces

technologies ont la possibilité de renseigner sur l'état de la végétation à travers une vue synoptique et une répétitivité élevée des acquisitions. En plus, elles ont le pouvoir d'observer différents phénomènes liés à la même unité spatiale et de donner des informations relatives aux caractéristiques topo-morphologiques en tous points du globe. La télédétection fournit des outils d'observation et de suivi de la biosphère continentale par l'intermédiaire d'instruments de mesures (radiomètres, spectromètres, radar, etc.) embarqués à bord de satellites ou d'avions. La télédétection offre ainsi un potentiel considérable pour soutenir la surveillance des forêts.

Plusieurs initiatives de suivi des écosystèmes forestiers mondiaux sont apparues avec le développement et les évolutions de la télédétection. Parmi ces initiatives, les plus citées sont LandTrendr (Landsat-based detection of Trends in Disturbance and Recovery) qui utilise une série temporelle d'image Landsat pour la détection des changements et l'initiative GFW (Global Forest Watch) de l'université du Maryland qui met à disposition des cartographies de pertes et de gains de surfaces forestières entre 2000 et 2012 mises à jour annuellement depuis 2012 qui permet donc déjà d'harmoniser certains résultats (Hansen et al, 2013). Actuellement cette initiative a évolué vers un système d'alerte en temps réel sur la déforestation au niveau du globe. Ces deux initiatives utilisent les images satellites obtenues avec les techniques de la télédétection optique avec des capteurs passifs. *(Les capteurs passifs, comprenant tous les instruments optiques et thermiques, mesurent le rayonnement réfléchi ou émis par les surfaces dans certaines longueurs d'onde).*

D'autres initiatives de suivi de la couverture mondiale des forêts existent, utilisant les techniques de la télédétection radar. C'est le cas du Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), qui avec les données radar du capteur Land Observing Satellite (Palsar-1 et Palsar-2) produit des cartographies de forêt / non forêt au niveau mondial sur les périodes de vie des capteurs ALOS (ALOS 1 entre 2007-2010 (http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/palsar.htm)) et ALOS2 depuis 2015 (http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/obs/pal2_obs_guide.htm)). L'observation radar est un mode de télédétection actif. Elle correspond au domaine des ondes centimétriques (de 1 centimètre à 1 mètre environ) de longueur d'onde. Dans ce domaine, les ondes éléctromagnétiques généralement employées pour l'étude de la surface terrestre sont peu sensibles aux conditions atmosphériques (Shimada et al, 2014).

La télédétection satellite, aussi bien optique que radar, pour le suivi des écosystèmes forestiers a pris un essor considérable ces dix dernières années et la progression ne semble pas devoir s'arrêter. La démocratisation de l'utilisation des techniques associées est en pleine progression, de plus en plus de données sont mises à la disposition des gestionnaires des ressources et cela

gratuitement. Les agences d'observation spatiales donnent accées libre à de plus en plus de données d'imageries spatiales dont la qualité, d'année en année, devient meilleure. Des données Landsat (Landsat-1 à Landsat-8) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) aux données Sentinel-2 de l'ESA (Agence Spatiale Européenne) avec le programme Copernicus dans la gamme de la télédétection optique en passant par les données ALOS/PALSAR de la JAXA et Sentinel-1 de l'ESA dans la gamme de la télédétection radar, les gestionnaires disposent aujourd'hui d'une pléiade de données spatiales en archive ou en acquisition pour la surveillance, la planification et la bonne gestion des ressources naturelles. Au niveau du secteur forestier surtout dans les pays en développement, l'accès facile et gratuit aux données de télédétection constitue un important progrès pour la connaissance des écosystèmes forestiers et un moyen indispensable pour la planification et la gestion durable de ces ressources forestières. Elle doit s'accompagner de la formation, pour traiter les données et gagner en autonomie.

Avec l'accès gratuit des données de télédétection, il est donc possible d'étudier avec plus de précision l'historique de l'évolution des écosystèmes en lien avec les événements ou phénomènes historiques survenus dans les zones citées précédemment (conflits socio-politiques, conflits armés, grande sécheresse etc.). Il est également possible d'explorer les limites de la discrimination des classes d'occupation avec les nouvelles données disponibles, d'analyser l'évolution saisonnière des écosystèmes, d'analyser avec le plus de précision possible les types des strates d'occupation du sol et leurs évolutions dans le temps afin de répondre aux exigences, aux enjeux et aux besoins de leur gestion durable. Plusieurs études utilisant les données de télédétection optique et radar de façon séparée ont été menées pour le suivi et l'analyse des impacts des phénomènes et actions anthropiques sur les écosystèmes. Cependant nettement moins de travaux ont concerné le potentiel de complémentarité des données optiques et radar pour le suivi des écosystèmes tropicaux et ainsi que pour leur cartographie.

L'objectif général de nos travaux est d'explorer sur différents sites d'étude les potentialités des données libres et gratuites de télédétection optiques, radar ainsi que leur potentiel de fusion, pour l'analyse historique de l'évolution de l'occupation du sol dans divers contextes, la discrimination fine des structures (détaille dans les classes d'occupation du sol) composant les écosystèmes forestiers tropicaux (les changements de déforestations, de dégradation et les changements saisonniers). De cet objectif général, il est attendu une analyse diachronique de l'évolution de l'occupation du sol dans les zones de conflits, une évaluation de la capacité de séquestration du carbone des galeries forestières des aires protégées, la détection des zones de changements dans l'occupation des sols (déforestation, dégradation, perte de zone de mangrove).

Le manuscrit comprend sept chapitres et une conclusion :

- **Partie I :** Généralités sur la forêt et la télédétection, description des sites d'étude, présentation des données utilisées et des approches méthodologiques**.**
    - **Chapitre I :** Généralités sur les écosystèmes forestiers, la télédétection et état de l'Art ;
    - **Chapitre II :** Descriptions des sites d'étude et des données utilisées ;
    - **Chapitre III :** Les approches méthodologiques utilisées sur les différents sites.
- **Partie II :** Applications, Présentation et Discussion des résultats
    - **Chapitre IV :** Analyse diachronique de l'impact des conflits armés successifs sur l'évolution de l'occupation du sol dans le Paysage des Virunga autour du Parc National des Virunga (PNVi) en RDC de 1985 à 2017 ;
    - **Chapitre V :** Évaluation des ressources forestières des aires protégées du Togo : Cas de la réserve de biosphère d'Oti – Keran – Mandourie (OKM) et de la réserve de faune de Togodo (RFT).
    - **Chapitre VI :** Etude de cas en Guyane : la plaine littorale de Kourou et la zone frontière de Saint Georges de l'Oyapock
    - **Chapitre VII :** Analyse diachronique sur des écosystèmes vulnérables au changement climatique dans le paysage de la province de Monté Cristi en République Dominicaine.

Partie III : Conclusions Générales

Partie I :

Généralités sur la forêt et la télédétection, présentation des sites d'étude et des données utilisées, présentation des méthodologies

Cette partie I comprend les trois premiers chapitres de cette thèse. Le chapitre I est consacré aux généralités sur les forêts, la télédétection et l'état de l'art sur l'utilisation des images spatiales pour l'étude des écosystèmes forestiers. Le chapitre II décrit les sites d'étude et les données utilisées. Le chapitre III présente les différentes approches méthodologiques utilisées sur les différents sites.

Chapitre I : Généralités sur les écosystèmes forestiers, la télédétection et état de l'Art.

Sommaire

Introduction

I. Généralités sur les écosystèmes forestiers
   I.1 Définition
   I.2 Typologie des écosystèmes forestiers
   I.3 Rôle des écosystèmes forestiers
   I.4 Rôle des forêts dans le stock global du carbone
II. Généralités sur la télédétection
   II.1. Introduction
   II.2. Télédétection optique et radar
      II.2.1. Télédétection optique
         II.2.1.1. Les photographies aériennes
         II.2.1.2. Les images satellitaires (optiques)
      II.2.2. Télédétection radar
         II.2.2.1 Principes de fonctionnement
         II.2.2.2 Les images satellites
         II.2.2.3 Les Résolutions des images radar en géométrie sol
         II.2.2.4 Le chatoiement
         II.2.2.5 Nombre de vue ou de Look des images radar
         II.2.2.6 Mesure radar : Coefficient de rétrodiffusion
   II.3 Description des capteurs optiques et radar utilisés
      II.3.1 Description des capteurs optiques
         II.3.1.1 Description du capteur LANDSAT
         II.3.1.2 Description du capteur SENTINEL-2
      II.3.2 Description des capteurs radar
         II.3.2.1 Description du capteur ALOS/PALSAR
         II.3.2.2 Description du capteur SENTINEL-1
III. Etat de l'Art
   III.1 Etat de l'art sur l'utilisation des données de télédétection optique
   III.2 Etat de l'art sur l'utilisation des données de télédétection RADAR

Introduction

Ce premier chapitre aborde trois grandes thématiques : les écosystèmes forestiers, la télédétection et l'état de l'art sur l'utilisation des images spatiales pour l'étude de ces écosystèmes. Dans la première partie il sera question des concepts généraux sur les écosystèmes (définitions, caractéristiques, typologie, répartition), leur fonctionnement et leur rôle. Dans la deuxième partie nous aborderons les concepts de base de la télédétection (optique et radar). Dans la troisième partie nous discuterons de l'utilisation des données de télédétection pour l'étude et le suivi des écosystèmes à travers des outils spécifiques d'extraction d'informations ciblées.

I I. Généralité sur les écosystèmes forêts

I I.1 Définition

Il existe de multiples définitions du terme ***« forêt »*** suivant la partie du globe terrestre où l'on se trouve. Mais dans la plupart des cas ces définitions se réfèrent toujours aux caractères officiels et internationaux du terme. Il s'agit de la définition donnée par l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). D'après la FAO sont définies comme forêt« *des terres occupant une superficie de plus de 0,5 hectare avec des arbres atteignant une hauteur supérieure à cinq mètres à l'âge adulte et un couvert arboré de plus de 10 %, de par rapport à la surface de 0,5 ha ou avec des arbres capables d'atteindre ces seuils in situ »* (FAO, 2015). Les forêts et autres types de terres boisées couvrent au total 3999 millions d'hectares de surface soit 30,6% de la superficie des terres émergées selon les données de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, 2015). A travers le monde, le taux de boisement par pays varie de 1% à 98%. L'Europe avec la fédération de la Russie cumule près du quart (1/4) de la surface mondiale de la forêt soit 10 millions de km^2. En Afrique, la forêt couvre une surface de 600 millions d'ha. La figure 1 montre la proportion des forêts suivant les grandes régions du monde (Figure 1).

Les domaines forestiers peuvent être regroupés dans deux grandes catégories suivant les espèces qui les composent et leurs comportements (Figure 1, Figure 2, Figure 3).

- ***Les forêts de résineux :*** 36% des forêts mondiales sont des forêts de résineux. On retrouve ces formations dans les pays de l'hémisphère Nord tels que le Canada, la Fédération de Russie, dans certains pays européens autour de la Méditerranée et les pays scandinaves.

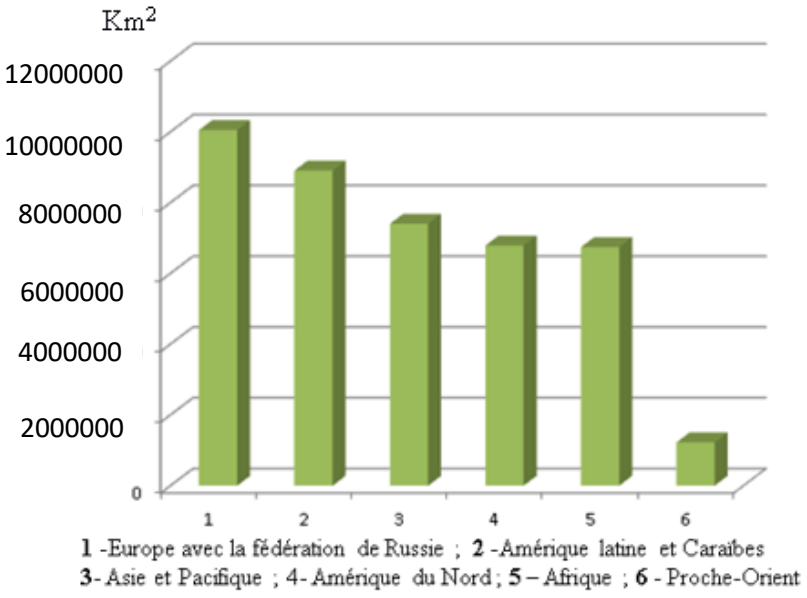


Figure 1 : Répartition de la forêt (Km^2) suivant les régions du monde (source FAO, 2015).

- ***Les forêts de feuillus :*** 64% des forêts mondiales sont des forêts de feuillus. Les forêts de feuillus sont surtout rencontrées dans les zones tropicales.

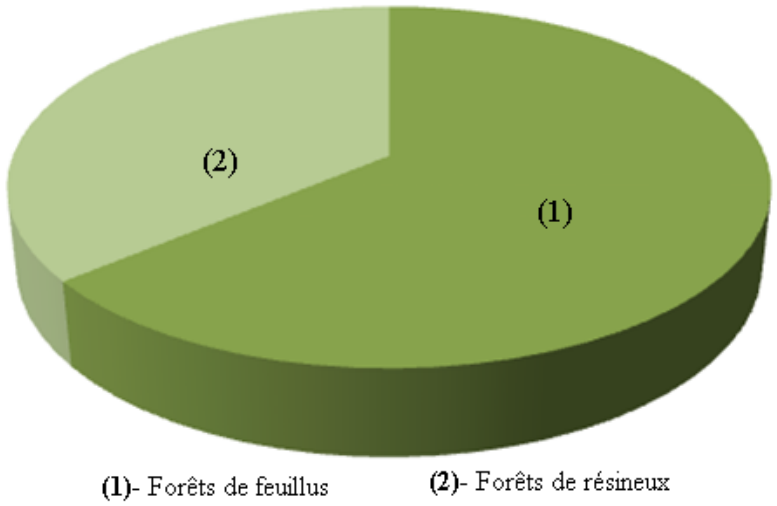


Figure 2 : Répartition des forêts feuillus/résineux (ONF, 2010)

En fonction de leur état d'exploitation ou d'interaction avec les hommes, on peut classer les forêts en quatre grands groupes :

- ***Les forêts naturelles :*** les forêts primaires, ou plus couramment les forêts vierges, sont des forêts intactes. Ce sont des forêts formées d'essences indigènes et où aucune trace d'activité humaine n'est visible et où les processus écologiques ne sont pas perturbés par la présence humaine ou les activités humaines.
- ***Les forêts secondaires :*** les forêts secondaires sont des forêts qui se sont régénérées là où des forêts primaires ont subi des modifications anthropiques telles que l'exploitation

forestière, l'agriculture ou l'élevage. Ces forêts présentent plus ou moins des différences majeures en termes de structure et d'espèces par rapport aux forêts primaires.

- ***Les forêts semi-naturelles :*** il s'agit des forêts formées d'espèces indigènes régénérées de façon naturelle, où des traces d'activités humaines sont clairement visibles. Les forêts semi-naturelles sont des forêts obtenues à l'issue de plantation, de semis ou de régénération naturelle assistée. Il s'agit d'un ensemble homogène entre essences endogènes et essences exogènes issues de plantations.
- ***Les forêts artificielles ou plantations forestières :*** Ce sont des domaines établis artificiellement par plantation ou par semis. Les arbres peuvent appartenir à la même espèce (qu'elle soit indigène ou introduite). L'objectif des plantations forestières peut être la production de bois et de produits non ligneux (plantations de production) ou la fourniture de services.

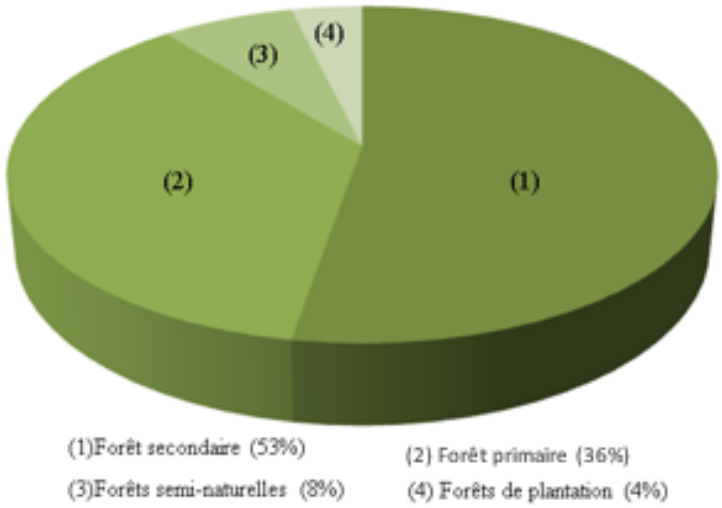


Figure 3: Caractéristiques des forêts du monde (source FAO, 2010)

I I.2 Typologie des écosystèmes forestiers

La réalisation d'une typologie est une démarche méthodique qui consiste à définir des ensembles afin de faciliter les analyses et les classifications. Ainsi on peut subdiviser les écosystèmes forestiers par grandes zones climatiques (Tableau 1) :

- ***Les écosystèmes de forêt boréale (ou Taïga) :*** Ils se situent dans l'hémisphère Nord, sur le pourtour du cercle polaire. Ces écosystèmes forestiers sont essentiellement composés de conifères (résineux) (sapins, mélèzes, épicéas et pins).
- ***Les écosystèmes de forêt tempérée:*** Ils sont composés d'essences à feuilles caduques (feuillus) (peupliers, bouleaux, charmes, hêtres, chênes) et de conifères (selon les régions : pins, sapins, cèdres, séquoias…).
- ***Les écosystèmes de forêt tropicale et subtropicale :*** Ils sont composés pour certains de plusieurs étages de végétaux et se caractérisent par leur richesse biologique (forêts

tropicales humides pour l'essentiel). On y dénombre ainsi plus de 50.000 espèces d'arbres.

Tableau 1 : Typologie des écosystèmes forestiers (Holdridge, 1947 ; ECOFOR, 2014)

Grandes zones climatiques	Physionomie	Composition d'ensemble
A- Ecosystèmes tempérés	A1- Forêts tempérées	A1.1 - Forêts de feuillus
		A1.2 Forêts de conifères
		A1.3 - Forêts mixtes
		A1.4 - forêts plantées
		A1.5 - Momentanément déboisées
	A2- Autres terres boisées (landes, maquis, garrigues, friches, etc.)	
	A3- Bosquets	
B- Ecosystèmes tropicaux	B1- Forêts tropicales et subtropicales	B1.1 - Forêts tropicales denses humides
		B1.2 - Forêts tropicales (semi-) sèches
		B1.3 - Mangroves
		B1.4 - Forêts de montagne en zone tropicale
		B1.5 - Plantations en zone tropicale
		B1.6 - Momentanément déboisées
	B2 – Autres terres boisées (mangroves < 5 m, savanes boisées, etc.)	
C-Ecosystèmes boisés boréaux	C1 – Forêts boréales	C1.1 - Forêts boréales de conifères
		C1.2 - Momentanément déboisées
	C2 – Autres terres boisées (Landes, friches, etc.)	

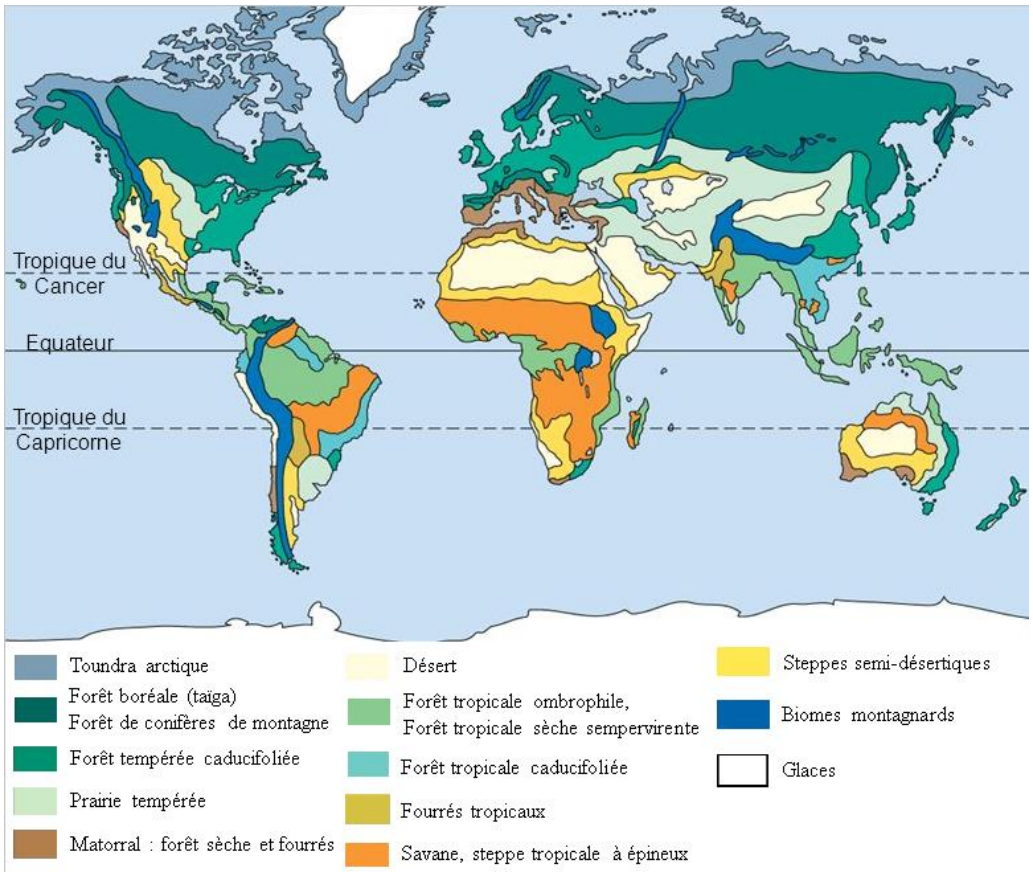


Figure 4: Typologie des écosystèmes forestiers au niveau mondial (Source : Schnell, 1971).

I I.3 Rôles des écosystèmes forestiers sur le plan climatique

Les écosystèmes forestiers remplissent des fonctions sociales et culturelles essentielles aux populations. Les populations rurales à travers les activités de cueillette et de chasse entre autres utilisent la forêt pour la satisfaction des besoins alimentaires.

Plusieurs secteurs de l'activité économique sont concernés notamment le secteur de la construction, de l'ameublement, du papier pour impression, de l'agriculture, du transport, de l'énergie. Tous ces secteurs utilisent des produits de la forêt notamment le bois brut ou transformé provenant des forêts naturelles ou artificielles. Tous ces secteurs d'activités émettent du CO_2 dans leur processus industriels.

Les écosystèmes forestiers occupent ainsi une place primordiale dans les cycles biogéochimiques globaux (Guitet, 2015) et interviennent ainsi dans la régulation du cycle hydrique, d'azote, d'oxygène et de carbone à travers le phénomène de respiration et de photosynthèse (Ramade, 2011). En effet par la photosynthèse, les feuilles de la plante absorbent le CO_2 de l'atmosphère, rejettent du dioxygène et fabriquent, grâce à la chlorophylle et la lumière, des glucides (contenant du carbone) nécessaires au développement des plantes.

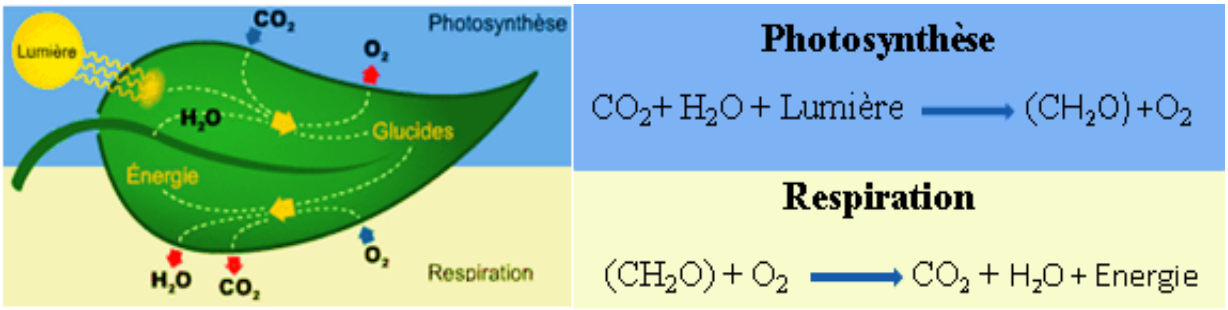


Figure 5: Schématisation de la photosynthèse et de la respiration au niveau d'une feuille (Köppen, 1936).

La respiration cellulaire est aussi une partie clef du cycle de carbone ou du bilan carboné. Elle consomme une partie du carbone assimilé par la photosynthèse. Ce mécanisme de photosysnthése est le principal acteur de la production de bois et du recyclage du CO_2 atmosphérique (Pargade, 2000).

I I.4 Rôle des forêts dans le stock global du carbone

Le carbone est présent et stocké dans plusieurs réservoirs : l'atmosphère, les écosystèmes marins et terrestres, les réserves fossiles et les sédiments calcaires (http://www.ipcc.ch). D'après le Groupe Intergouvernemental d'Etude du Climat, on estime à plus de 2000 GtC le carbone stocké dans la biosphère. Les forêts mondiales renferment entre 35 et 50% du carbone accumulé dans les écosystèmes terrestres (soit environ 1000-1400 Gt C ou 2500- 4000 Gt C). 40 % de ce stock se trouve dans la partie aérienne des forêts. Le stock de carbone dans les forêts

du monde se répartit approximativement à 49% dans les forêts boréales, 38% dans les forêts tropicales et 13% dans les forêts tempérées et méditerranéennes (FAO, 2015). Les forêts mondiales représentent un puits de carbone de l'ordre de 2,6 Gt C/an (9,5 tCO_2/an), (Mazas, 2007). Les forêts tropicales primaires, absorbent jusqu'à 0.5 t C/ha/an. De plus, l'utilisation des produits du bois sous forme d'ameublement ou dans les constructions prolonge le stockage du carbone et réduit les émissions de ce gaz à effet de serre. Les forêts tropicales avec une proportion d'environ 38% des forêts du monde stockent environ 428Gt C soit plus de 15% du carbone stocké dans toutes les forêts du monde. Cet écosystème forestier est le plus sujet à perturbations par la déforestation et la dégradation à travers des activités humaines (exploitation forestière, augmentation de la population, augmentation des activités agricoles, expansion des villes).

La déforestation est la cause de la régression des surfaces couvertes de forêt. Elle résulte des actions de déboisement ou de défrichement, liées entre autres à l'extension des terres agricoles, à l'exploitation des ressources minières du sous-sol, à l'urbanisation, à l'exploitation excessive et anarchique du bois des forêts (FAO, 2010). La déforestation et la dégradation libèrent dans l'espace des quantités importantes de CO_2. En vue d'adopter une gestion raisonnable des zones forestières pour réduire la déforestation, il parait nécessaire de connaitre l'historique de l'occupation des sols et le stock de carbone sur pied de ces écosystèmes forestiers. L'analyse de l'évolution historique des surfaces de l'occupation des sols et l'estimation des quantités de carbone stockées dans les différentes classes d'occupation du sol nécessitent la réalisation de cartographies cohérentes et homogènes des zones considérées. Les éléments naturels à considérer dans les cartes d'occupation du sol pour l'estimation du stock de carbone sont, entre autres, les éléments boisés (forêt ou plantation), les éléments de savanes, les zones agricoles, les zones de prairie, les zones humides. La cartographie et le suivi du stockage de carbone dans ces éléments naturels sont réalisés à l'aide des données satellites d'observation de la terre (télédétection). Les satellites d'observation représentent des outils appropriés pour l'étude et l'analyse historique de l'évolution surfacique de la biosphère terrestre.

Si l'évaluation de l'évolution des surfaces découle de l'usage des images, l'évaluation des stocks de carbone demande d'utiliser des équations spécifiques appelées ‘‘équations allométriques’’. Celles-ci prennent comme données d'entrées des informations dendrométriques simples comme la hauteur totale du houppier des arbres et le diamètre à 1,30 m des arbres des écosystèmes concernés.

I II. Généralités sur la télédétection

I II.1 Introduction

Cette partie introduit les généralités sur la télédétection comme outil majeur pour la caractérisation des éléments et leurs cartographies. Nous pouvons retrouver plus de détail sur les bases théoriques de la télédétection dans les documents des auteurs suivants : Polidori, 1997, Maître, 2001, Massonnet et Souyris, 2008, Ulaby et al, 2014. D'autres détails techniques sont à trouver également dans les supports de cours et vidéos pédagogiques de l'ENSG et l'ESA, RUDANT 2014, 2015.

La télédétection joue un rôle majeur car elle permet d'obtenir des informations sur les caractéristiques physiques, biophysiques et biologiques des éléments de la surface terrestre au travers des capteurs qui acquièrent à distance des rayonnements électromagnétiques émis ou réfléchis par les éléments de la surface terrestre.

Les capteurs de télédétection aéroportés ou satellitaires acquièrent des informations sur de larges surfaces. Ils fournissent ainsi des informations spatialisées nécessaires à l'étude et à la caractérisation des écosystèmes comme les écosystèmes forestiers et plus spécifiquement les écosystèmes forestiers tropicaux qui présentent un intérêt majeur pour notre étude.

Il existe deux domaines principaux d'acquisition des données par les capteurs de télédétection, le domaine passif et le domaine actif (figure 6). Le domaine est dit passif lorsque le rayonnement électromagnétique utilisé provient d'une source naturelle comme le soleil. Il est dit actif lorsque le rayonnement électromagnétique provient du capteur lui-même.

Le domaine passif comprend essentiellement des images dites optiques et thermiques. Les capteurs optiques opèrent grâce à des ondes électromagnétiques dans les régions visibles, proche et moyen infra-rouge (PIR-MIR) du spectre électromagnétique. Les capteurs thermiques captent les rayonnements émis par la surface du globe terrestre.

Le domaine actif correspond aux images dites RADAR (Radio Detection And Ranging) et aux images LIDAR (Light Detection and Ranging). Les RADAR imageurs fonctionnent avec les ondes centimétriques correspondant à la région hyperfréquence du spectre électromagnétique. Comme les capteurs optiques, les capteurs LIDAR fonctionnent grâce à des ondes électromagnétiques appartenant à la plage spectrale du visible, du PIR et du MIR. Notons que le domaine actif utilisant la région hyperfréquence du spectre électromagnétique n'est que très faiblement sensible aux conditions atmosphériques. Ainsi, de nuit comme de jour et par temps couvert, des images Radar peuvent être acquises, ce qui n'est pas le cas de la télédétection des domaines optiques.

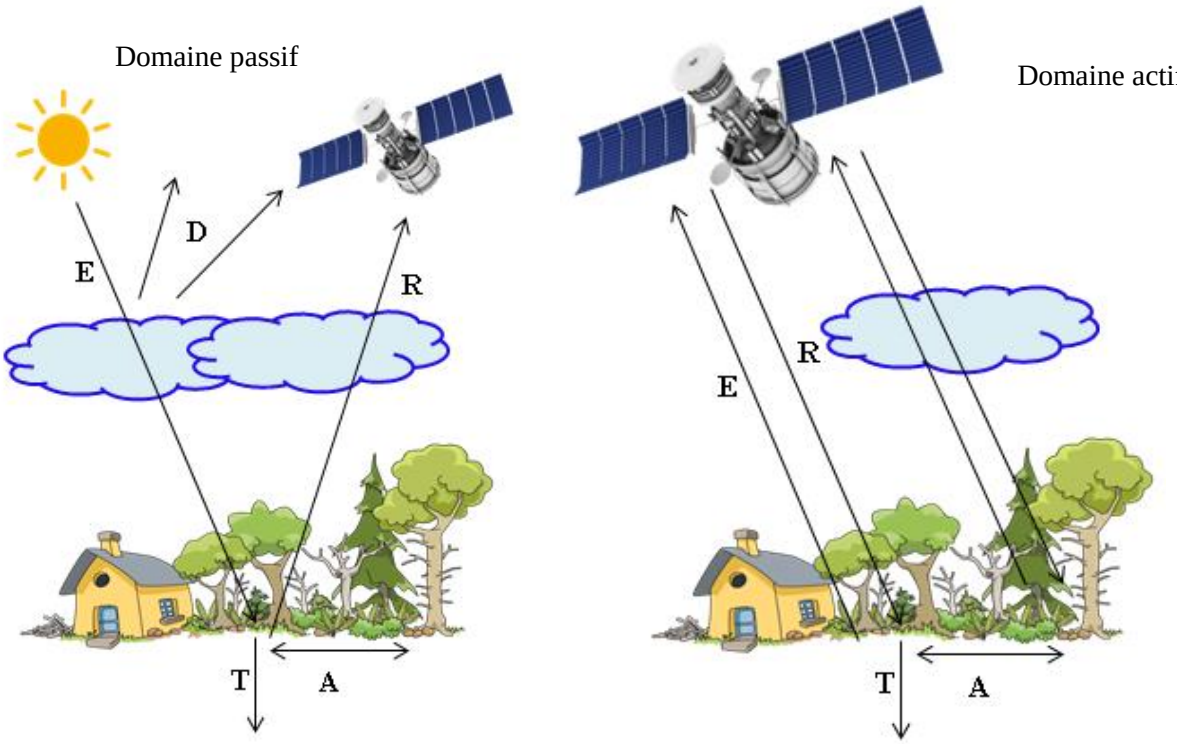


Figure 6 : Fonctionnement du domaine actif et passif en télédétection (E : Rayonnement incident/émis, T : Transmis, A : Absorbé, D : Diffusé, R : Réfléchi)

I II.2 Télédétection optique et radar

La télédétection offre une diversité importante de données, de méthodologies et d'approches d'analyses des données pour cartographier les écosystèmes sur des surfaces variant du niveau local au niveau continental en passant par le niveau régional ainsi que de quelque hectares à des milliers de kilomètres carrés (Rundquist et al., 1997). Dans le cadre de cette étude, les données des plateformes LIDAR ne sont pas utilisées. Nous avons exploité les données des capteurs optiques et RADAR. Selon les capteurs, les paramètres d'acquisition des données, les données et les indicateurs qui dérivent de ces données sont différents. Dans la suite de cette partie nous allons présenter brièvement les paramètres associés aux domaines optiques et radar.

I II.2.1 Télédétection optique

Les capteurs imageurs optiques sont des capteurs aérospatiaux qui enregistrent une partie des rayonnements solaires réfléchis à la surface du sol (figure 7). Chaque capteur optique est caractérisé par les bandes spectrales dans lesquelles il opère (les plages spectrales de l'optique étant les ‘‘visible’’, ‘‘PIR’’ et ‘‘MIR’’). Les bandes spectrales de l'optique sont les suivantes:

- de 0.4 µm à 0.7 µm pour le spectre visible ;
- de 0.7 µm à 3 µm pour le spectre proche et moyen infra rouge (signature spectrale de la végétation, de l'humidité des sols) ;
- 4 µm à 50 µm pour le spectre infrarouge thermique.

Les ondes ou les rayonnements émis par le soleil traversent l'atmosphère, interagissent avec la surface terrestre avant d'être réfléchis par cette surface pour être enregistrés par le capteur. Le signal électromagnétique enregistré par le capteur doit être traité pour réduire les effets de l'atmosphère. Cette étape est nécessaire car la trajectoire des ondes ou du rayonnement émis par le soleil comporte une double traversée de l'atmosphère avant et après la réflexion par la surface, avant d'atteindre le capteur.

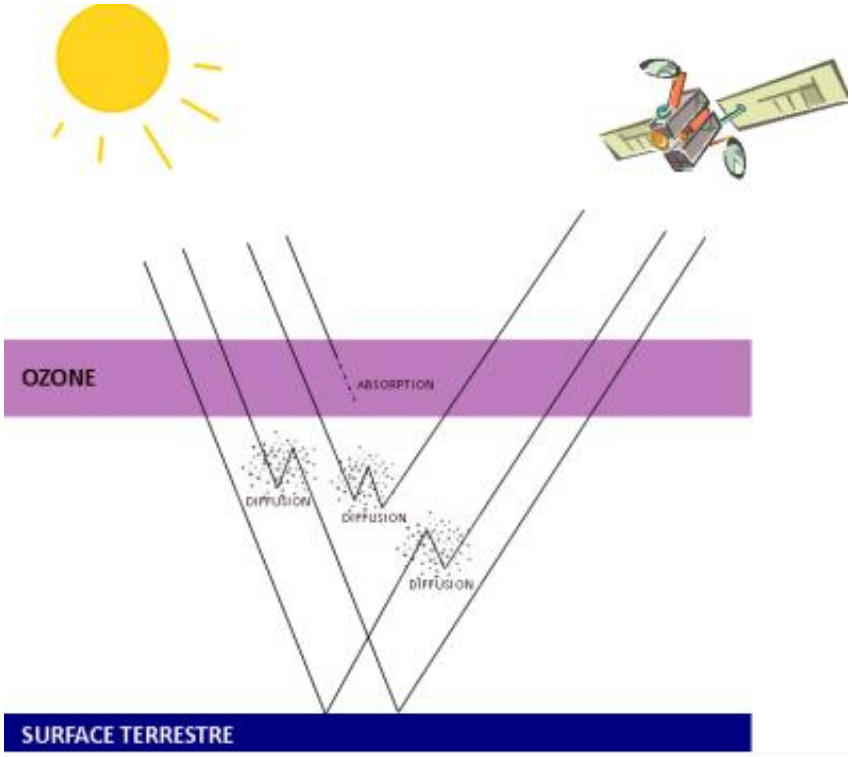


Figure 7: Double interaction du rayonnement solaire avec l'atmosphère (www.e-cours.univ-paris1.fr/modules)

Lorsque le rayonnement électromagnétique atteint les objets de la surface, une partie de l'énergie est absorbée (absorption), une autre partie du rayonnement est réfléchie par l'objet. Une partie du rayonnement peut éventuellement être transmise au travers de l'objet si celui-ci est plus ou moins transparent, avec un changement de la direction de propagation dû à la réfraction. Le coefficient de réflexion appelé *réflectance* est la proportion de l'énergie réfléchie par la surface des objets, elle est fonction de la nature et des caractéristiques intrinsèques des objets et des surfaces et de la longueur d'onde. La mesure effectuée au niveau du capteur dépend du flux solaire, de l'état de l'atmosphère, de la nature de la surface et de la géométrie d'acquisition (positions du soleil et du capteur). Une modélisation adaptée permet, dans les bons cas, de déduire la réflectance de la mesure effectuée au niveau du capteur. La courbe décrivant la variation de la réflectance avec la longueur d'onde est appelée signature spectrale. Il s'agit de la principale donnée, issue de la télédétection optique, qui caractérise une surface (figure 8). C'est cette signature spectrale qui guide le choix des canaux en imagerie multi-spectrale.

Lorsqu'une image est acquise dans une seule et large bande qui couvre tout le domaine visible, on parle d'image panchromatique.

Dans la catégorie des images optiques, on distingue généralement les photographies aériennes et les images satellitaires.

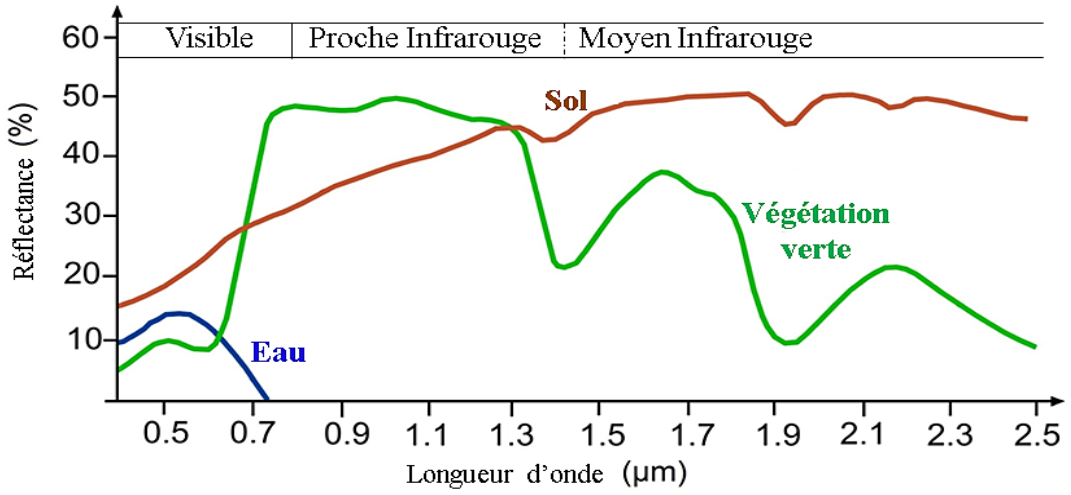


Figure 8:Signature spectrale de l'eau, du sol nu et de la végétation dans différentes longueurs d'ondes (www.seos-project.eu/modules).

II.2.1.1. Les photographies aériennes

Les photographies aériennes sont utilisées depuis plusieurs décennies pour la cartographie de l'occupation du sol. Voir par exemple Anderson et Wobber, 1973; Cowardin et Myers, 1974 dans le cas des écosystèmes tropicaux. Les photographies aériennes sont disponibles sur différents supports matériels (film, papier) en mode mono spectral ou en couleur. Actuellement, les produits sont disponibles en formats numériques, mono et multi spectraux.

La résolution spatiale des images de photographies aériennes est très fine, elle est d'ordre décimétrique (entre 10 et 50 cm). Elles peuvent, de ce fait, servir de base pour la délimitation précise des zones agricoles, des zones de cours d'eau, des zones végétalisées et l'identification des espèces dans les massifs forestiers. Ces données sont le plus souvent utilisées pour contrôler la qualité des cartographies produites avec d'autres données satellitaires moins résolues spatialement.

Cependant, les photographies aériennes présentent des inconvénients notables :

- L'acquisition ne peut s'effectuer qu'en l'absence de nuage (sauf les avions qui volent sous la couverture nuageuse) ;
- Les acquisitions ou les scènes ne couvrent que des emprises limitées de quelques dizaines de kilomètres carrés. Cela peut constituer un frein pour la couverture des grandes régions ou d'un territoire de façon régulière ;
- L'acquisition s'avère au final très onéreux.

Il faut aussi noter que l'interprétation des photographies aériennes par photo-interprétation demande beaucoup de ressources en temps, ce qui peut constituer également une contrainte supplémentaire sur des zones de superficie considérable. Dans cette étude, des photographies aériennes ne seront utilisées que pour des contrôles sur certains sites très localisés (Guyane).

II.2.1.2. Les images satellitaires optiques

Cette présentation générale sera limitée aux données libres d'accès pour les cartographies locales ou régionales que nous avons menées dans cette étude. Elle sera centrée autour de certaines caractéristiques principales de ces images que sont : les orbites d'acquisition, l'effet du relief, les résolutions d'acquisition spatiale, les bandes spectrales, la période de revisite.

Les orbites d'acquisition : Les satellites optiques d'observation en orbite autour de la terre sont essentiellement de trois types (Bonn et Rochon, 1992) : l'orbite géostationnaire (il s'agit d'orbite équatoriale et circulaire à une altitude d'environ 36000 km), l'orbite héliosynchrone (il s'agit d'une orbite circulaire quasi polaire où le plan de l'orbite du satellite est déterminé de manière à observer régulièrement un point particulier à la même heure locale solaire) et les orbites basses non héliosynchrones. Les images qui sont utilisées dans cette étude sont acquises à partir d'orbites héliosynchrones. Cette caractéristique réduit les variabilités d'éclairement solaire aux variations saisonnières lorsque l'on souhaite comparer plusieurs images. Pour les capteurs usuels, l'acquisition a lieu de jour sur la phase descendante de l'orbite.

Effets du relief : le relief occasionne des effets radiométriques liés aux variations de direction du flux solaire et des effets géométriques liés aux positions respectives du point imagé et du capteur (figure 9).

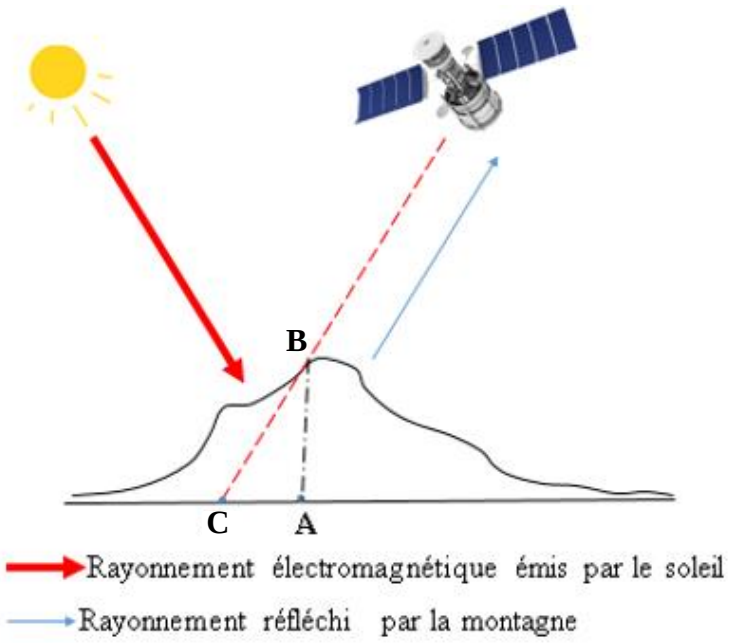


Figure 9: Schématisation des effets du relief : Le point **B** est localisé comme s'il était en **C** dans le plan de référence : il s'agit d'effet de parallaxe.

Les résolutions d'acquisition : trois types de résolution caractérisent un capteur optique :

- *La résolution spatiale* : elle correspond à la surface élémentaire d'échantillonnage observée instantanément par le capteur. Dans le cas des capteurs optiques, il est usuel de simplifier l'approche et de confondre cette surface élémentaire avec la taille du pixel.
- *La résolution temporelle ou répétitivité ou encore période de revisite :* elle correspond à la période entre deux acquisitions de la même scène en un point donné du globe terrestre. Cette caractéristique ne dépend pas du capteur mais de l'orbite et du mode de pilotage du satellite. La résolution temporelle des images varie de quelques jours à quelques mois (elle dépend fortement de l'aptitude au dépointage dont bénéficient certains capteurs).
- *La résolution spectrale :* elle correspond aux bandes de longueurs d'onde auxquelles les capteurs sont sensibles.

II.2.2 Télédétection RADAR

Le mot RADAR est le sigle de l'expression en langue anglaise RAdio Detection And Ranging, c'est à dire ‘‘détection par onde radio et mesure de la distance’’. Comme nous l'avons évoqué précédemment le système radar est un système actif, c'est-à-dire qu'il illumine une portion du globe terrestre avec une onde électromagnétique et reçoit les échos réfléchis par les objets qui s'y trouvent.

II.2.2.1 Principes de fonctionnement

L'antenne radar ou l'émetteur, au cours de son déplacement, lance latéralement à intervalles réguliers en direction des cibles au niveau du sol, des impulsions électromagnétiques très brèves, avec une fréquence de répétition fixée. Ces cibles réfléchissent les impulsions reçues, et l'antenne capte les échos avec un décalage par rapport à l'émission. Le décalage est d'autant plus grand que les cibles sont lointaines.

Au prix de traitements relativement complexes que l'on regroupe sous le nom de « Synthèse d'ouverture », le système génère une image où à chaque point correspond une mesure complexe amplitude et phase (l'amplitude est liée à la puissance reçue selon la cible ; la phase est liée aux temps de propagation entre antenne et les cibles présentes dans le pixel). On nomme ce format de données SLC pour Single Look Complex. Sur une ligne de l'image SLC, les points du sol sont classés en distance par rapport à l'antenne. Il s'agit ainsi de la géométrie d'acquisition radar.

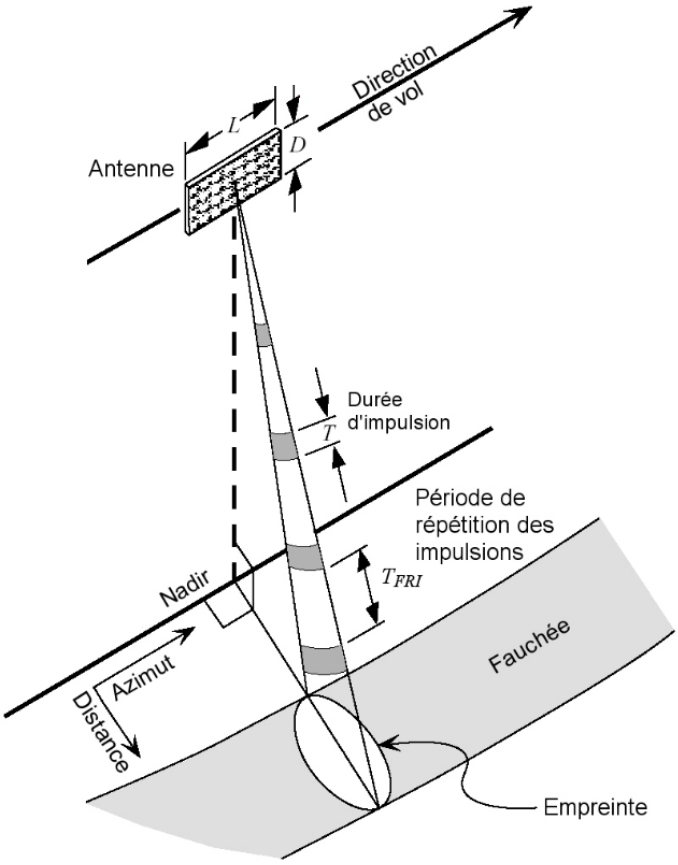


Figure 10: Géométrie d'acquisition radar (Olmsted, 1993)

Les systèmes radar utilisent une gamme de longueurs d'ondes du domaine des hyperfréquences ou micro-ondes variant de 0.8 cm à 1.3 m. Les longueurs d'onde ou les régions du domaine spectral ont été divisées en bandes. On distingue les bandes Ka, K, Ku, X, C, S, L et P.

Tableau 2: Bandes radar, plages de fréquences et de longueurs d'onde (CCT, 1980)

Bande	Fréquence (GHz)	Longueur d'onde (cm)
P	0.225 – 0.390	100 – 30
L	0.39 – 1.55	30 – 15
S	1.55 – 4.20	15 – 7,5
C	4.2 – 5.75	7,5 – 3,75
X	5.75 – 10.9	3,75 – 2,4
Ku	10,9 – 22,0	2,4 – 1,67
Ka	22,0 –36	1,1 – 0,75

Pour ces longueurs d'onde, les images s'avèrent insensibles aux nuages, aux voiles nuageuses etc d'où l'intérêt de l'utilisation des images radar dans des zones tropicales (zones caractérisées par une persistance de perturbations atmosphériques et des nuages).

Dans les systèmes radar les ondes émises ou reçues sont polarisées. La polarisation joue un rôle important sur la réponse radar et son traitement. Le champ électrique émis par l'émetteur RADAR peut être polarisé verticalement (V) ou horizontalement (H) en relation avec les axes

principaux de l'antenne, ce qui conduit pour un sol horizontal à une direction effectivement horizontale H perpendiculaire au plan d'incidence et une direction dite verticale V lorsque le champ est contenu dans le plan d'incidence (direction effectivement verticale si l'antenne vise à l'horizontale).

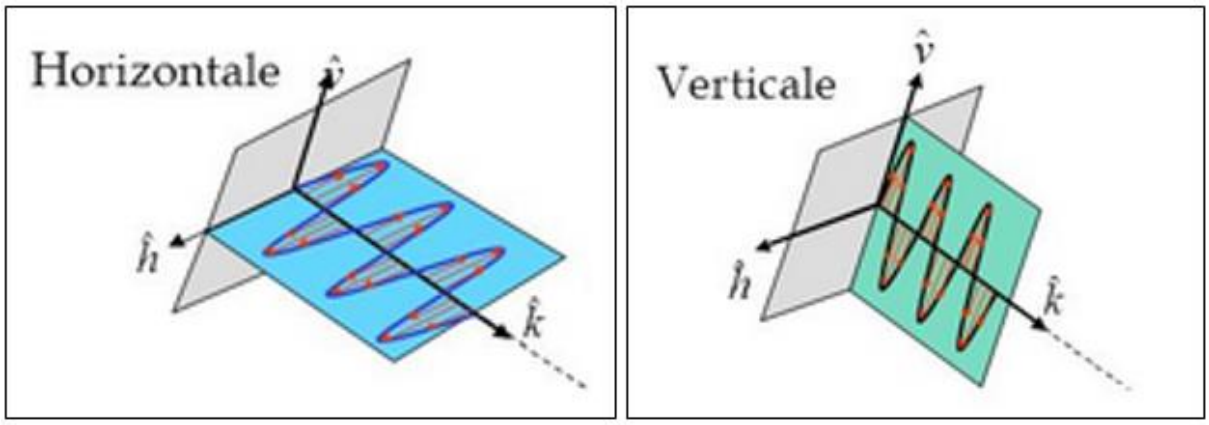


Figure 11: Polarisation horizontale (H) et verticale (V) du signal Radar (CCT, 1980)

Le signal rétrodiffusé par les objets de la surface peut ensuite être réceptionné par l'antenne selon l'une des deux polarisations (V) ou (H). Il en résulte que les polarisations possibles pour une image sont les co-polarisations HH et VV et les cross-polarisations HV ou VH (la première lettre désigne la polarisation en réception, la seconde en émission, mais ce choix peut être inversé). Ce problème de nomenclature n'est pas important car pour les RADAR monostatiques où la même antenne joue le double rôle d'émetteur et de récepteur, les deux quantités mesurées dans les polarisations HV et VH sont égales.

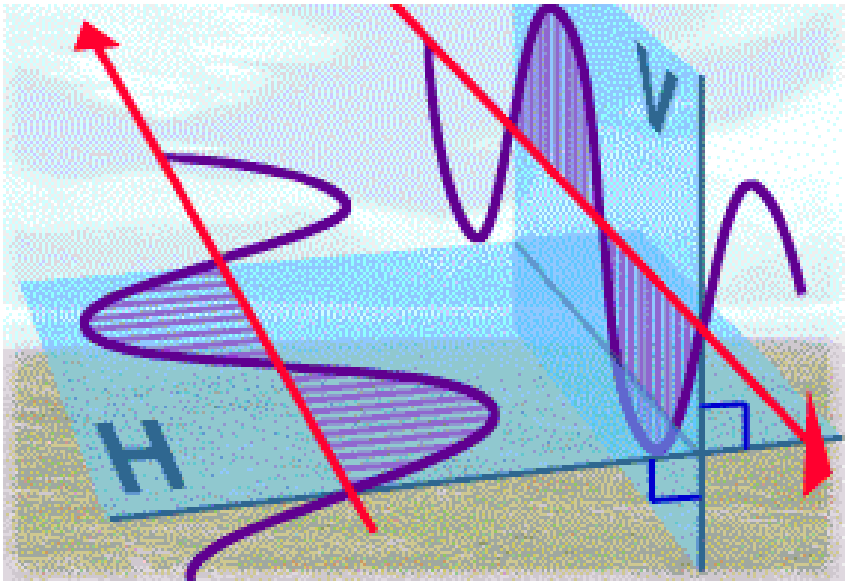


Figure 12: polarisation croisée HV ou VH (CCT, 1980)

Comme nous l'avons fait pour les images optiques, nous allons résumer ci-dessous quelles sont les grandes caractéristiques des images radar.

Pour les systèmes radar, on ne fait pas de distinction entre les capteurs aéroportés et les satellites. En effet les instruments embarqués sont très voisins et la distinction entre les deux types d'images ne présente pas le même caractère historique que dans le cas des photographies aériennes et des images satellites optiques ; de plus, comme nous allons le voir, la résolution spatiale est indépendante de la distance Antenne - Sol.

II.2.1.2 Les images satellites

Les images radar satellitaires sont acquises, selon une visée latérale droite ou gauche, à partir d'orbites héliosynchrones, de jour en orbite descendante et de nuit en orbite montante. L'inclinaison ou l'angle entre les plans orbitaux des orbites montante et descendante est de l'ordre de – 8 et + 8 par rapport à l'axe de la terre. Les images acquises sur ces deux types d'orbite auront des types d'empreintes différentes, différences variant fortement avec la latitude. La période de revisite dans les mêmes conditions d'acquisition va diminuer lorsque la fauchée augmente. Cette période de revisite est de quelques jours à quelques mois (ENSG, 2017).

II.2.1.3 Les Résolutions des images radar en géométrie sol

- ***Cas d'un sol plat :***

Les images radar sont nativement obtenues en géométrie dite radar où la cellule de résolution est anisotrope, les deux directions longitudinale (ou azimutale) et transversale (ou radiale) n'étant pas équivalentes (figure 13 et 14).

La résolution radiale s'exprime en fonction de la durée de l'impulsion radar τ. En effet comme l'onde radar se propage à la vitesse de la lumière c, le temps de trajet aller-retour ***T*** d'une impulsion (***T*** = 2***D**/c) permet de calculer la distance **D** entre le capteur radar et la surface cible :

$$D = Tc/2$$

La résolution radiale oblique ***Rr*** (fonction de la durée de l'impulsion radar) est donnée par la relation suivante :

$$Rr = \tau.c/2$$

La résolution radiale au sol ***Rs*** dépendant de l'angle d'incidence θ_{local} (dans la direction transverse), est donnée par la relation suivante :

$$Rs = \tau.c/2\sin(\theta_{local})$$

Notons une propriété remarquable ; ***Rs*** est indépendant de la distance antenne-sol mais elle dépend fortement de l'incidence locale.

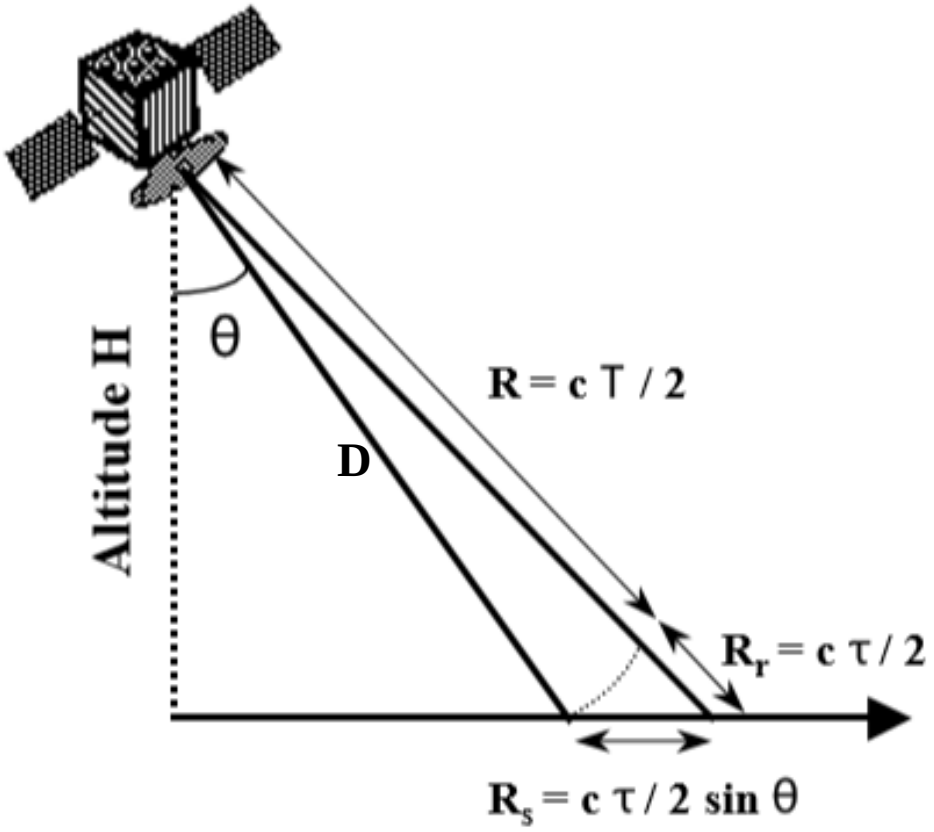


Figure 13: Représentation de la résolution radiale.

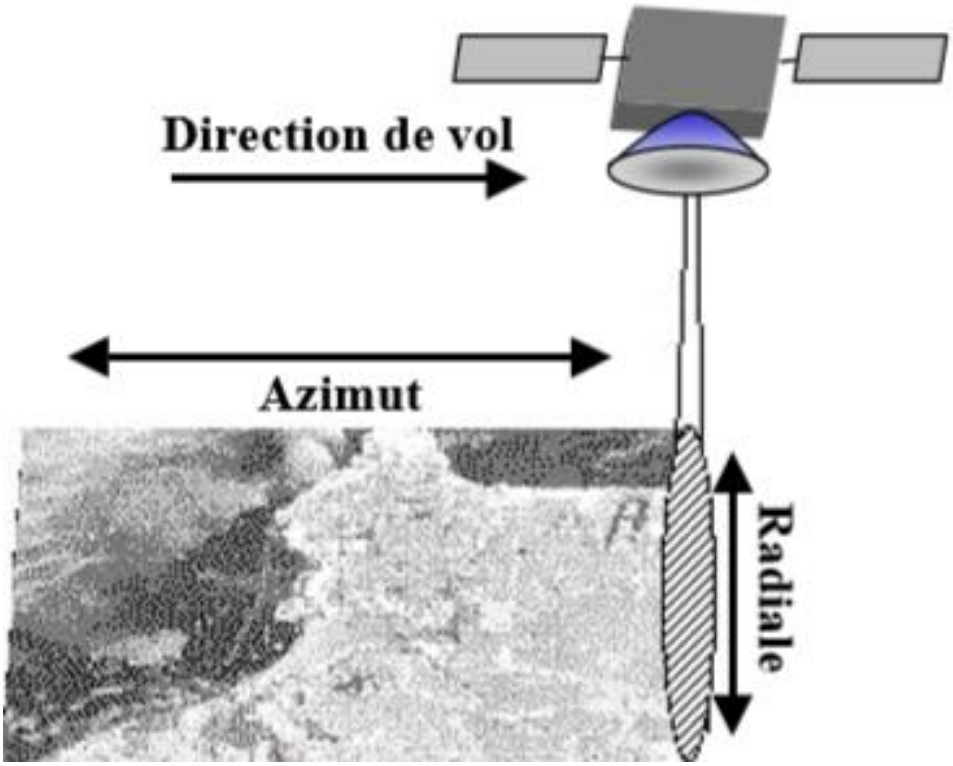


Figure 14:Construction d'une image radar en utilisant le déplacement du capteur (Ulaby al, 1987)

L'image radar est construite en utilisant le déplacement de l'antenne dans la direction de vol, permettant ainsi d'éclairer une bande de surface qui correspond à la résolution longitudinale (***Ra***). Les lignes sont acquises progressivement au cours du temps.

Pour un radar à ouverture réelle, la résolution ***Ra*** est donnée par la relation suivante :

$$Ra = \lambda D / d$$

où λ est la longueur d'onde, D la distance antenne – cible et d la longueur de l'antenne.
Après le traitement de synthèse d'ouverture (SAR) (Massonnet et Souyris, 2008), on obtient :

$$\mathbf{Ra = d/2}$$

une valeur indépendante de la distance antenne-cible, propriété déjà rencontrée pour la résolution transversale (ou d est la longueur de l'antenne donc d'ordre métrique).
Afin d'obtenir des images avec des pixels carrés, un traitement de correction géométrique est nécessaire. Ce traitement géométrique consiste à transformer l'image initiale en géométrie radar en une image en géométrie sol. Dans le cas des images radar les données quantitatives de résolution ne coïncident pas avec la taille du pixel, que ce soit en géométrie radar ou en géométrie sol, avec des valeurs différentes selon la direction retenue. Ainsi la connaissance de la résolution liée au capteur donne lieu à un échantillonnage de fréquence adéquate ce qui définit alors la taille du pixel. Cette configuration d'image en géométrie sol avec des pixels carrés est mieux adaptée au traitement ultérieur de l'image radar (ENSG, 2014).

- ***Cas d'un sol en pente : Effet du relief***

Le relief, d'origine naturelle ou anthropique (bâtiments, ouvrages d'art etc.), engendre différentes distorsions géométriques. Ainsi, lorsqu'une onde électromagnétique est réfléchie par le sommet d'un objet, elle est reçue avant celle renvoyée par la base de ce même objet. Dans le cas simple d'une surface plane de pente ***''p''***, mesurée algébriquement positivement lorsque la face est orientée vers l'antenne, la résolution dans la direction longitudinale a des valeurs approximativement égales à celle trouvée pour un sol plat, par contre la valeur de la résolution transversale (ou radiale) au sol est donnée par la relation suivante :

$$Rrg = c /(2B \sin(\theta - p)) \qquad \text{puisque} \qquad (\theta local) = \theta - p$$

Où B est la largeur de la bande de modulation sur l'image radar produite, différents phénomènes se produisent en fonction de la valeur de la pente :

- *Phénomène de raccourcissement :* Ce phénomène s'observe lorsque la pente face au radar est inférieure à l'incidence. L'image subit une compression (La taille du pixel sol est plus grande et l'image subit une compression)

- *Phénomène de rabattement :* Un objet apparait comme replié dans la direction du capteur. Il se produit lorsque la différence de distance entre cibles et satellite, le sommet de la cible (montagne par exemple) est plus proche du capteur que sa base.
  Ce phénomène s'observe lorsque la pente face au radar est supérieure à l'angle d'incidence.
  Pour les faces opposées à l'antenne, leur pente 'p' doit être comptée négativement dans les expressions précédentes et l'image subit une dilatation, et le *Phénomène d'ombre* peut apparaitre lorsque l'angle d'incidence est supérieur (***90°- p)*** (***p*** étant la pente absolue des faces opposées à l'antenne). Ce phénomène apparait lorsque le relief est suffisamment marqué pour une incidence donnée.

Pour un sol plat, la surface de la cellule de résolution au sol couvre une surface égale à :

$$\Delta S_{solplat} = Ra * Rrg = (d/2) * c / (2B \sin(\theta))$$

Pour un sol de pente p, nous obtenons $\Delta S_{sol} = Ra * Rrg = (d/2) * c / (2B \sin(\theta - p))$
La surface du pixel au sol d'une pente ''p'' est liée à la surface du pixel au sol plat par la relation suivante :

$$\Delta S_{sol\ pente\ ''p''} = \Delta S_{solplat} * ((Sin(\theta)/Sin(\theta - p))$$

Ainsi l'existence de pentes occasionne des effets géométriques liés au classement des points sur l'image produite en fonction de la distance à l'antenne du capteur.
Il en résulte des effets radiométriques importants car la puissance reçue par l'antenne est proportionnelle à la surface du pixel au sol. Pour un même type de surface en zone plate ou pentue, nous aurons donc une relation entre puissances <P> reçues par le capteur, du type

$$\langle P \rangle_{sol\ pente} = \langle P \rangle_{sol\ plat} * ((Sin(\theta)/Sin(\theta - p))$$

entre radiométries obtenues (on suppose dans cette relation simplifiée que le coefficient de rétrodiffusion radar ne dépend pas ou peu de l'incidence locale, ce qui est approximativement exact pour les couverts forestiers) (Copernicus, 2017).

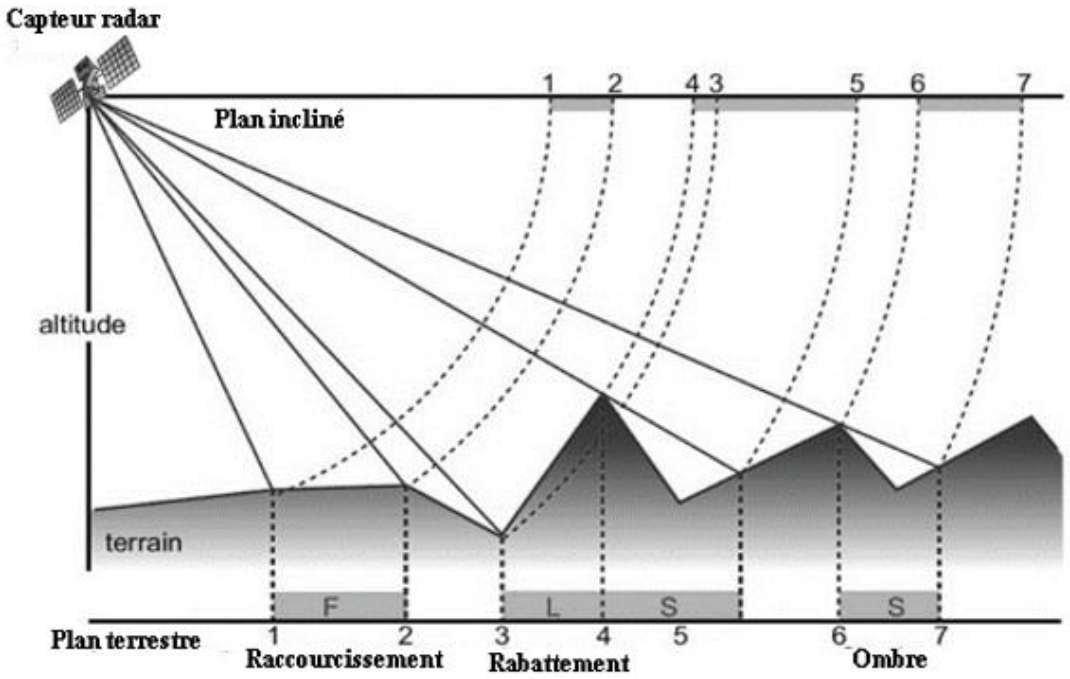


Figure 15: Les déformations géométriques sur les images radar (CCRS, 2001)

Dans cette analyse, différentes zones d'étude ont été explorées. Les sites tests au Togo (réserve de biosphère de l'OKM et réserve de faune de togodo (RFT) sont relativement plats et donc très peu affectés par les déformations géométriques. C'est également le cas pour le site de Saint George de l'Oyapock en Guyane française. Sur le site de la plaine de Kourou en Guyane française, on observe de légères déformations du relief dans les zones de forêts denses. Par contre, des déformations géométriques importantes sont observées sur le site test du paysage des virunga et Monté Cristi car ces zones sont caractérisées par une forte variation de relief avec des montagnes dont l'altitude peut atteindre 5000 m.

II.2.1.4 Le chatoiement

Une image est composée de points juxtaposés les uns à côté des autres sous forme matricielle. Chaque élément de l'image (pixel) est défini par son amplitude et sa position dans l'image. La réponse individuelle de chaque élément de l'image est caractérisée par une très forte variabilité due à la nature cohérente de l'onde électromagnétique utilisée et réfléchie par l'ensemble des réflecteurs ou cibles distribués de manière aléatoire dans le paysage. En termes de champ électrique, cette réponse correspond à la somme des réponses individuelles des cibles élémentaires présentes dans la cellule de résolution. Il en résulte un phénomène d'interférences aléatoires (elles peuvent s'additionner : ***interférences constructives*** ou se soustraire : ***interférences destructives***) qui conduit à une réponse en amplitude fortement variable. Une cible homogène formée de nombreux pixels apparaît ainsi avec un aspect « poivre et sel ». Ce phénomène est appelé chatoiement en français et ''speckle'' en anglais.

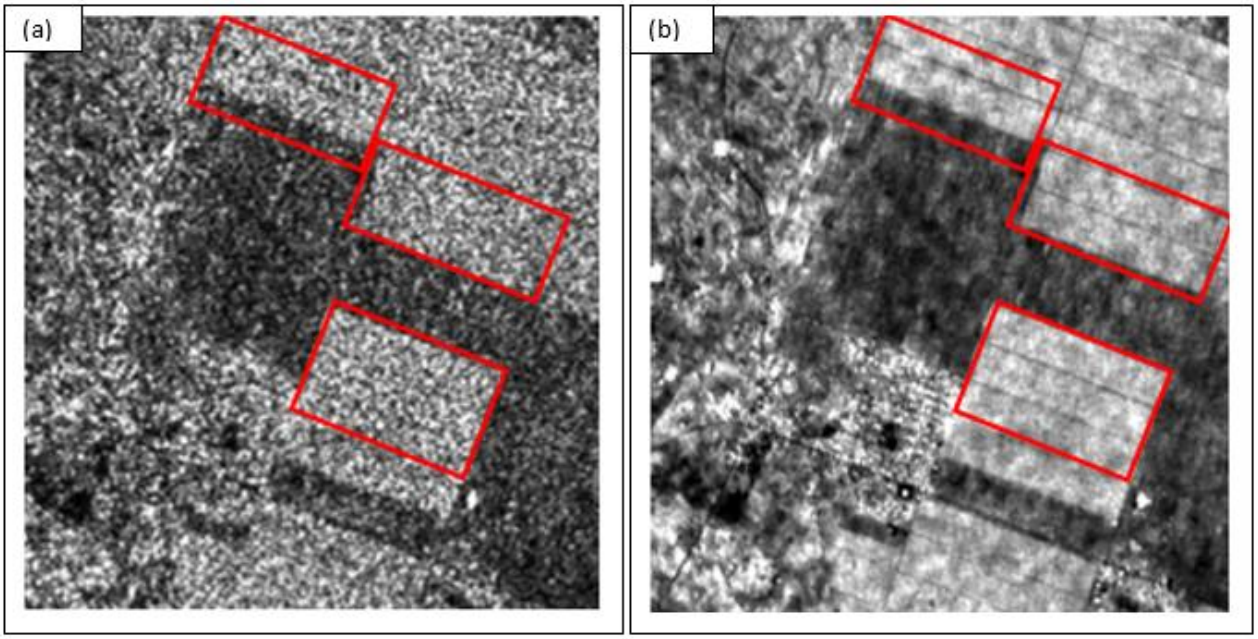


Figure 16: Image Sentinel-1 originelle (a), et après application du filtre de Quegan (b), extrait sur le site de Monté Cristi

Les illustrations de la figure 16 extraites des images SAR Sentinel-1 utilisées par la suite dans cette étude présentent le phénomène de ‘‘speckle’’ sur des parcelles agricoles (a). L’application d’un filtre numérique atténue le phénomène et modifie l’aspect de l’image (b). Différents algorithmes, basés sur des approches spatiales ou temporelles ou multi temporelles, ont été développés afin de réduire le ‘‘speckle’’. Ils sont utilisés pour la détection de formes particulières, de contours, ou d’objets (Maitre, 2001).

II.2.1.5 Nombre de vues (ou de ‘‘Look’’) des images radar

Une image native est caractérisée par des cellules de résolution dont l’écho comporte une partie réelle et une partie imaginaire. Cette image correspond à une image à ‘‘une vue’’ ou ‘‘single look complex’’ (ou SLC). Pour cette image SLC sur une zone homogène, la variabilité radiométrique (nommé coefficient de variation) est donnée par les relations suivantes pour l’intensité I et l’amplitude A (avec $I=A^2$) :

- $Cv_I = \sigma(I) / espérance\ (I) = 1$ (avec σ (I) écart type de l’intensité),
- $Cv_A = \sigma(A)/espérance\ A) = 0.527$ (avec σ (A) écart type de l’amplitude).

Sur les images SLC, le coefficient de variation est élevé, ce qui signifie que le chatoiement (effet poivre et sel) est maximal

Dans la pratique on travaille avec des images en géométrie sol dont les pixels carrés ont été obtenus en effectuant une moyenne sur les amplitudes et intensités de l’image SLC. Il s’agit alors d’images dites à N-Vues, N étant le nombre de pixels qui ont été moyennés à l’étape précédente.

Le terme N est appelé le nombre de vues ou look. Le chatoiement est alors réduit, et N quantifie cette amélioration de l’image. Pour les images radar spatiales livrées en géométrie sol, ce

nombre N est en général de l'ordre de 3 ou 4. Pour les images Sentinel-1, que nous avons, entre autres utilisées dans cette étude, les deux types de format d'image sont caractérisés par un nombre de vues différent: image Sentinel-1 en format SLC (N=1, une vue par définition) et image Sentinel-1 en format GRD (multi-vues 4 à 9 vues).

II.2.1.5 Mesure radar : le Coefficient de rétrodiffusion σ° et le coefficient associé γ°

Dans le cas de la mesure radar, on s'intéresse à l'interaction de l'onde émise avec les éléments du sol. Une partie de l'énergie électromagnétique envoyée par l'antenne radar est réfléchie dans toutes les directions du demi-espace supérieur et la mesure concerne l'énergie renvoyée vers le capteur radar dans la direction inverse de la direction de visée. Cette puissance moyenne renvoyée par un pixel au sol vers l'antenne de réception est appelée puissance rétrodiffusée.

Les calculs (voir https://rus-training.eu/course (séquences SAR-01 et SAR-06) montrent que la puissance retrodiffusée vers l'antenne (moyennée localement pour éliminer les effets du chatoiement) peut s'écrire sous la forme

$$\langle P \rangle = K\, \sigma^{\circ}\, S_{pixelsol}$$

où

K :est une valeur que l'on peut considérer comme constante sur une portion d'image (K dépend de la puissance émise par l'antenne, des caractéristiques de l'antenne et de la géométrie d'acquisition),

σ° : est appelé le coefficient de rétrodiffusion de la surface considérée (il dépend de la nature de la surface, de son état et de l'angle d'incidence locale)

Spixelsol : est la surface du pixel au sol

La calibration (que nous évoquerons dans la partie II.2. du chapitre III) des données permet de déduire la valeur du coefficient σ° de la puissance reçue en connaissant les conditions d'acquisition et les caractéristiques de l'antenne.

En pratique, nous avons retenu par la suite d'opérer des calibrations relativement au coefficient γ° egal à σ° /cos (i_{local}) car l'expérience montre que ce coefficient γ° dépend très peu de l'incidence locale sur la forêt dense. Cela correspond au cas présenté dans https://rus-training.eu/course (séquence SAR-06) ou la réflectivité globale de la surface dépend peu de l'incidence et où le diagramme directionnel de réflexion est approximativement isotrope dans le demi-espace supérieure.

Le coefficient ($1/\cos(i_{local})$) traduit le fait que le coefficient $\gamma°$ se rapporte à la surface du pixel sol projeté sur un plan orthogonal au faisceau.

Effectuer une calibration en $\gamma°$ est indiqué avec les images Sentinel 1 puisque l'incidence varie fortement au sein de la fauchée (entre 25° et 45° pour un terrain plat)

Au niveau de la calibration, nous avons retenu d'effectuer l'opération en supposant le terrain plat, ce qui conduit à des évaluations des coefficients faussés lorsque la pente du terrain n'est pas nulle

Nous avons en effet, de manière approchée (Paquerault, 1998):

$$\Delta S_{solpenté} = \Delta S_{solPlat} * (\sin(\theta) / \sin(\theta - p))$$

Ce qui conduit à

$$\mathbf{\sigma°calibre\ sol\ plat = \sigma°réel * (sin(\theta) / sin(\theta - p)}$$

et pour $\gamma°$

$$\mathbf{\gamma°calibre\ sol\ plat = \gamma°réel * (tg(\theta) / tg(\theta - p)}$$

ce qui entraine que les effets de pente restent très présents dans les images calibrées.

En pratique, il est souvent commode de convertir les valeurs de mesure en décibel selon la relation :

$$\mathbf{\gamma°_{dB} = 10 * \log_{10} (\gamma°_{en\ valeur\ naturelle})}$$

La conversion en décibels, permet de comprimer les valeurs en étalant la dynamique des valeurs les plus faibles et en comprimant celle des valeurs élevées, ce qui facilite en général l'interprétation des images.

- **Rétrodiffusion dans le couvert forestier**

En fonction de la longueur d'onde utilisée, correspondant à sa capacité de pénétration, la puissance rétrodiffusée par le couvert forestier peut être décomposée en :

- Diffusion de volume:
- Diffusion de surface,
- Interaction sol et végétation (Thiel, 2011).

Ces phénomènes de diffusion sont gouvernés par les caractéristiques du signal radar et par les propriétés diélectriques et géométriques du couvert (Figure 17).

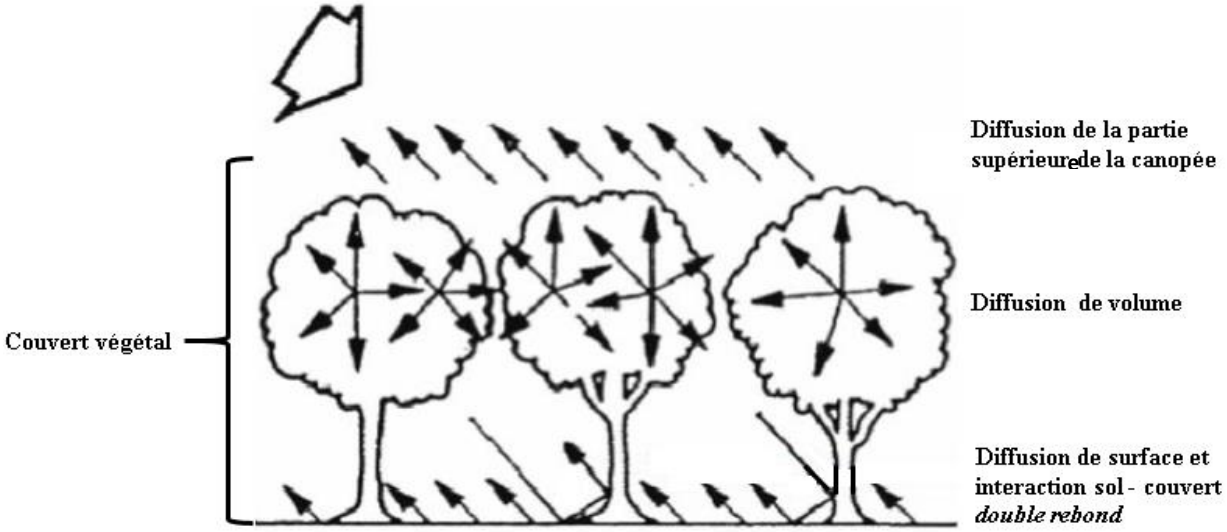


Figure 17: Mécanisme de rétrodiffusion de l'onde électromagnétique du couvert forestier (Thiel, 2011)

On utilise la notion de profondeur de pénétration, pour traduire l'effet de la propagation de l'onde à l'intérieur du couvert forestier. Cette notion correspond à la hauteur du couvert intervenant dans la diffusion de volume. Il s'agit de la profondeur à laquelle l'énergie de l'onde électromagnétique incidente est atténuée par un facteur $1/e^2$ (atténuation de 86% de l'onde environ). Elle est exprimée par l'équation suivante (Ulaby et al. 1982):

$$\delta_p = \frac{\lambda}{4\pi \left| \mathrm{Im}(\sqrt{\varepsilon}) \right|}$$

Avec λ = la longueur d'onde électromagnétique et ε la permittivité diélectrique relative.

Un signal pénétrera d'autant plus dans un milieu que sa longueur d'onde sera grande. La profondeur de pénétration peut varier de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres suivant la fréquence, la polarisation et les caractéristiques du couvert végétal.

Dans les courtes longueurs d'onde, les bandes C et X apportent une information sur le feuillage et les petites branches du haut de la canopée (figure 18). En bandes L et P la pénétration est plus importante et les diffuseurs sont les grosses branches et les troncs ; dans ce cas, l'onde peut atteindre le sol et être réfléchie et il est donc possible d'obtenir des informations sur le volume (hauteur et diamétre des arbres) du couvert.

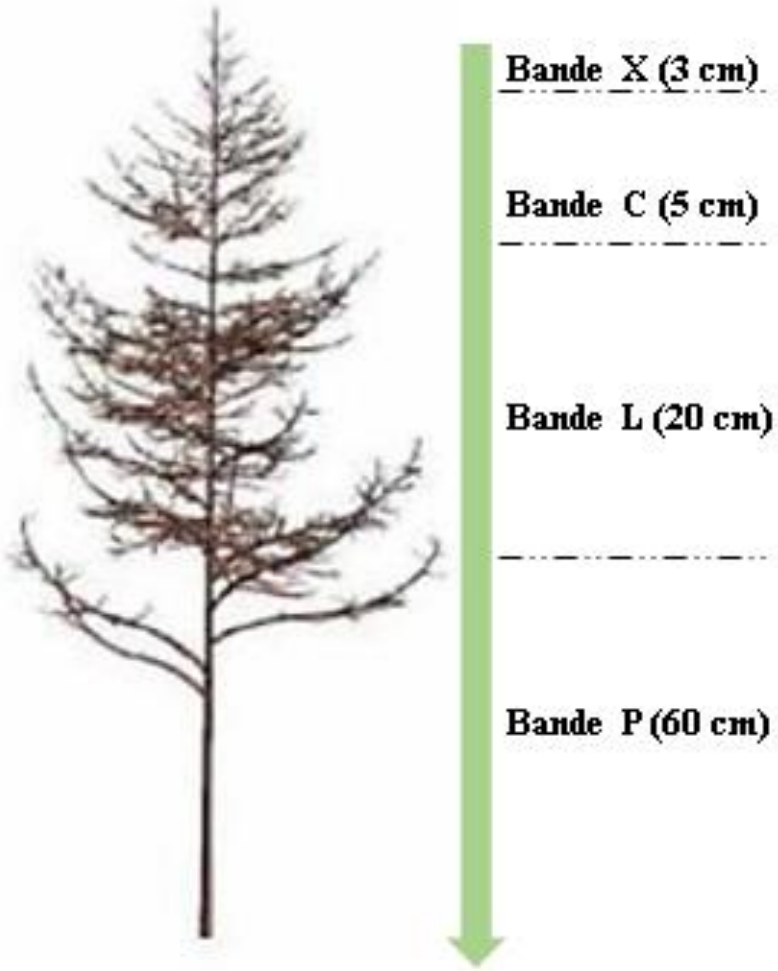


Figure 18:Capacité de pénétration du signal radar dans le couvert forestier en fonction de la fréquence du signal (Nicolini, 1997).

Dans le cas de notre étude nous avons exploré les images en bande C (Sentinel-1) et en bande L (Alos-2).

I II.3 Description des capteurs optiques et radar utilisés

Les données satellites utilisées dans cette étude proviennent des capteurs optiques et radar dont les descriptions sont les suivantes :

II.3.1 Description des capteurs optiques

Nous avons utilisé dans le cadre de cette étude des données optiques en accès libre provenant essentiellement de deux capteurs : le capteur LANDSAT et le capteur SENTINEL-2.

II.3.1.1 Description du capteur Landsat

LANDSAT est le nom du premier programme américain de télédétection spatiale d'observation de la terre par satellite destiné à l'utilisation civile. Développé par l'agence spatiale américaine (NASA), le premier satellite LANDSAT est lancé en juillet 1972. Depuis 1972, une base importante de données historiques d'archive est constituée avec des millions de données en format libre d'accès depuis lors sur la plateforme (www.earthexplorer.usgs.gov). Cela constitue des sources importantes et uniques pour l'étude des phénomènes comme les changements

climatiques, l'utilisation des sols, la cartographie, l'urbanisme etc. L'existence d'archives rend possible des analyses historiques sur des zones sensibles d'intérêt national ou international. Aussi les analyses historiques rendues possibles par l'existence d'images d'archives facilitent les modélisations de projection future de l'évolution des phénomènes comme la déforestation par exemple.

Jusqu'à nos jours, 8 satellites LANDSAT avec des capacités d'acquisition et de discrimination de qualité croissante ont été lancés en orbite par la NASA. Le tableau 3 donne les caractéristiques et informations techniques des 7 satellites LANDSAT mis en orbite depuis le début du programme. Le satellite Landsat-6 a été endommagé dès son lancement ce qui fait qu'il n'existe pas de données de ce capteur.

Tableau 3: Caractéristiques et informations techniques sur les satellites LANDSAT 1 – 8 (*www.landsat.usgs.gov/landsat-8*)

Type de capteur	**Résolution spectrale (µm)**	**Résolution spatiale (m)**	**Largeur de champ (km)**	**Temps de revisite**	**Altitude orbitale**	**Période de fonctionnement**
LANDSAT 1-3						
MSS	Canal 4 : 0,5-0,6	79×79	185	18 Jours	918 Km	Landsat 1 : 23/07/1972 - 06/01/1978 Landsat 2 : 22/01/1975 - 25/02/1982 Landsat 3 : 05/03/1978 - 30/11/1982
	Canal 5 : 0,6-0,7	79×79				
	Canal 6 : 0,7-0,8	79×79				
	Canal 7 : 0,8-1,1	79×79				
LANDSAT 4-5						
MSS	Comme LANDSAT 3	-	185	16 Jours	710 Km	Landsat 4 : 16/07/1982 - 02/1983 Landsat 5 : 01/02/1984 – nos jours
TM	Canal 1 : 0,45-0,52	30×30				
	Canal 2 : 0,52-0,6	30×30				
	Canal 3 : 0,63-0,69	30×30				
	Canal 4 : 0,76 - 0,9	30×30				
	Canal 5 : 1,55-1,75	30×30				
	Canal 6 : 10,4-12,5	120×120				
	Canal 7 : 2,08-2,35	30×30				
LANDSAT-7						
ETM+	comme Landsat 4-5	-	185	16 Jours	710 Km	15/04/1999 – nos jours
	Canal 6 :10,4-12,5	60×60				
	Panchromatique : 0,5-0,9	15×15				
LANDSAT-8						
OLI et TIRS	Comme Landsat-7	30×30	185	16 Jours	710 Km	2003 – nos jours
	Canal 1 : 0,433-0,453					
	Canal 9 :1,36-1,39					

	Canal 10 : 10,3-11,3	100×100				
	Canal 11 : 11,5-12,5	100×100				
	Panchromatique (8) : 0,5-0,68	15×15				

Les canaux correspondent aux bandes spectrales ou aux plages spectrales utilisées par les capteurs. La résolution spatiale est de 30 m pour les bandes spectrales du visible, de l'infrarouge et du proche infrarouge. Ces bandes sont les plus utilisées pour la distinction et l'étude de la végétation. A partir du Landsat-7 apparaît une nouvelle bande qui est la bande panchromatique. Cette bande est mieux résolue avec une taille de pixel de 15 m. Il est alors possible de rééchantillonner toutes les bandes initiales à 15 m en utilisant la technique spécifique de *panshapening*. Cette technique est décrite dans la partie méthodologie de cette thèse.

Nous avons utilisé les images d'archive provenant de Landsat-4, 5, 7 ainsi que des images plus récentes acquises avec Landsat-8.

II.3.1.2 Description du capteur Sentinel-2 (S-2)

L'Agence Spatiale Européenne (ESA) a développé un programme appelé *Copernicus ;* programme européen de surveillance de la planète Terre. Ce programme vise à doter l'Europe d'une capacité opérationnelle et autonome d'observation de la Terre en tant que « *service d'intérêt général européen, à accès libre, plein et entier ».* Il s'agit de mettre à disposition et en accès libre des produits cartographiques et des données satellitaires de qualité dans le domaine du suivi des composantes de l'environnement. L'ESA a ainsi développé un ensemble de missions appelées *mission Sentinel* destinées entre autres à la mise en orbite d'un ensemble de satellites optiques et radar afin de répondre aux objectifs opérationnels du programme *Copernicus.*

Depuis 2014, le programme a permis la mise en orbite (en décembre 2015 et décembre 2016) des satellites optiques multi-spectraux Sentinel-2A et 2B. Les deux satellites 2A et 2B sont sur une même orbite héliosynchrone, déphasés de 180° l'un par rapport à l'autre. Ces capteurs sont caractérisés par une résolution spatiale variable en fonction des bandes spectrales. Les images Sentinel-2 comprennent au total 13 bandes allant du domaine du visible au moyen infrarouge. Les tailles de pixel varient entre 10m, 20m et 60m. Le temps de revisite à l'équateur est de 12 jours pour chaque satellite. Il est donc de 6 jours pour le couple S-2A-S-2B.

Ces images sont utilisées dans de multiples applications comme le suivi du développement des cultures et forêts, de l'occupation des sols, des pratiques et productions agricoles, des littoraux. Sa période de revisite (6 jours à l'équateur) et la haute résolution spatiale (10 m) font de ces

données un outil exceptionnel pour l'étude de l'évolution de la végétation, de l'occupation des sols et de l'impact du réchauffement climatique.

Tableau 4: Caractéristiques des satellites Sentinel-2A et 2B (*www.sentinel2.cnes.fr*)

Type de capteur	**Résolution spectrale (µm)**	**Résolution spatiale (m)**	**Largeur de champ (km)**	**Temps de revisite**	**Altitude orbitale**	**Période de fonctionnement**
SENTINEL-2A, 2B						
MSI	Canal 1 : 0,433-0,453	60×60	250	10 Jours pour chaque capteur (les deux capteurs fournissent tous les 5 jours des images)	786 Km	SENTINEL-2A : 23/06/2015 – Nos jours SENTINEL-2B : 07/03/2017 – Nos jours
	Canal 2 : 0,455-0, 525	10×10				
	Canal 3 : 0,542-0,577	10×10				
	Canal 4 : 0,650-0,680	10×10				
	Canal 5 : 0,695-0,710	20×20				
	Canal 6 : 0,730-0,750	20×20				
	Canal 7 : 0,773-0.793	20×20				
	Canal 8 : 0,795-0,895	10×10				
	Canal 8a : 0,855-0,875	20×20				
	Canal 9 : 0,935-0,955	60×60				
	Canal 10 :1,365-1,390	60×60				
	Canal 11 : 1,555-1,645	20×20				
	Canal 12 : 2,10 – 2,28	20×20				

Tableau 5:Comparaison des satellites Sentinel-2 (ESA) et Landsat 8 (NASA / USGS). (www.regard-sur-la-terre.over-blog.com/tag/meteorologie)

Caractéristiques	**Sentinel-2**	**Landsat-8**
Altitude	786	705
Largeur de champ (km)	290	185
Nombre de bandes	13	11
Temps de revisite	5 jours (deux satellites)	16 jours (un satellite)
Résolution spatiale (m)	10/20/60	15/30/60/100
Masse Totale (kg)	1200	2782
Masse du capteur MSI (kg)	290	-
Masse du capteur OLI (kg)	-	432
Masse du capteur TIR (kg)	-	225

Le tableau 5 compare les principales caracteristiques des 2 capteurs Landsat-8 et Sentinel-2. Dans cette étude nous avons interprété les images Sentinel-2 de manière individuelle ou en combinaison avec les images radar Sentinel-1 (ou Alos-2) pour l'extraction des classes

d'occupation des sols. Les capteurs Sentinel-1 et ALOS/PALSAR seront décrits dans le paragraphe qui suit.

II.3.2 Description des capteurs radar

Nous avons à notre disposition des jeux de données radar provenant des capteurs SENTINEL-1 et ALOS/PALSAR en accès libre.

II.3.2.1 Capteur ALOS/PALSAR

- **ALOS/PALSAR-1**

L'Agence Spatiale Japonaise (JAXA) a lancé en Janvier 2006 le satellite ALOS (Advanced Land Observing Satellite) (Rosenquist et al, 2007). Sur ce satellite était embarqué un capteur radar opérant en bande L à une fréquence de 1,27 GHz et une longueur d'onde de 23,6 cm (λ=23,6 cm). Les premières données de ce capteur PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) étaient disponibles depuis Janvier 2007. Ce capteur fonctionnait selon cinq modes présélectionnés et mutuellement exclusifs :

- Fine Beam Single (FBS),
- Dual (FBD),
- Polarimetric,
- ScanSAR,
- Direct Transmission.

La période de revisite de 46 jours correspond au cycle orbital du satellite (orbite héliosynchrone). L'angle d'incidence du satellite est modifiable entre 8 et 60°. La taille du pixel est comprise selon les modes entre 10 et 100 m.

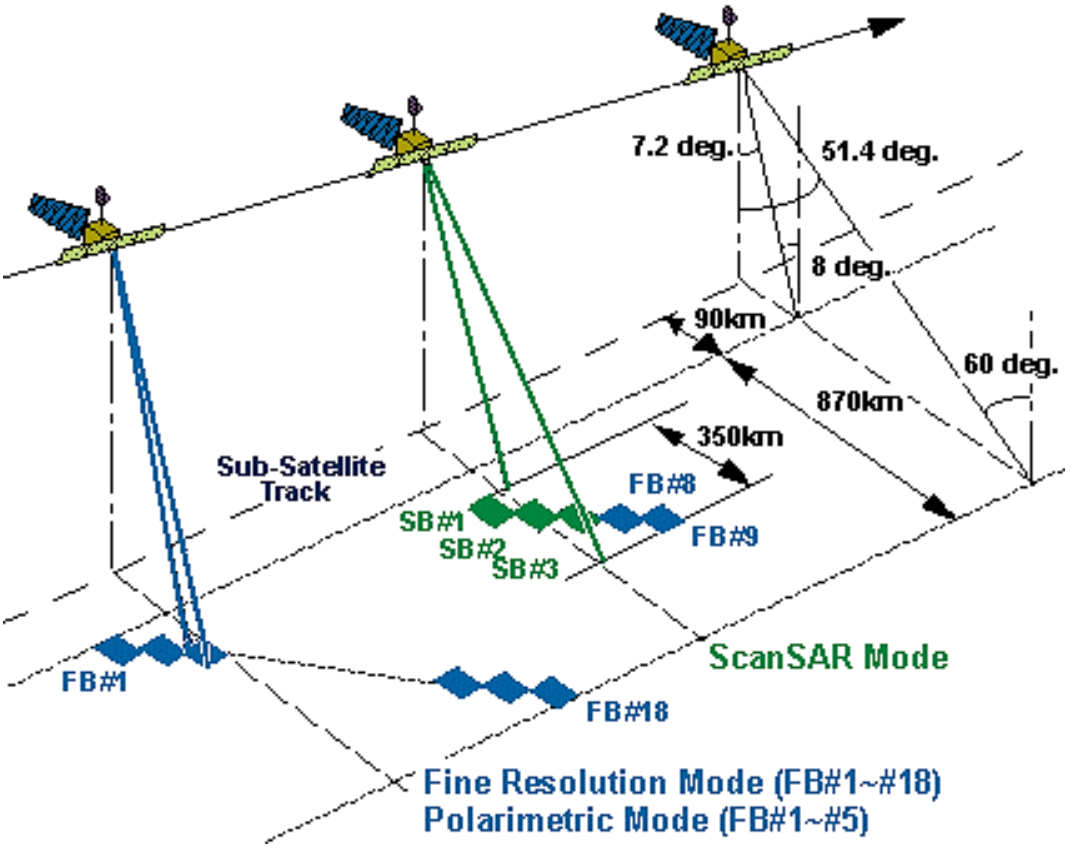


Figure 19: Mode d'acquisition et d'observation du capteur ALOS/PALSAR-1

Tableau 6: Les Caractéristiques du capteur ALOS/PALSAR
(http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/obs/overview.htm)

Mode	**Fine Beam Single (FBS)**		**ScanSAR**	**Polarimétrie**
Fréquence	1,27 GHz			
Polarisation	HH ou VV	HH+HV ou VV+VH	HH ou VV	HH+HV ou VV+VH
Angle d'incidence	8 à 60°		18 à 43°	8 à 30°
Taille du pixel	7 à 44 m		100 m	24 à 89 m
Fauchée	40 à 70 km		250 à 350 km	20 à 65 km
Codage de l'information	5 bits			3 à 5 bits
Masse Totale	600 kg			
Caractéristiques de l'antenne	Longueur = 8,9 m ; Largeur = 3,5 m			

Le 22 avril 2012 la JAXA a perdu le contact avec le satellite du fait d'un problème avec le générateur d'électricité. Ainsi depuis cette période le capteur PALSAR a cessé de fonctionner et le monde scientifique ne dispose plus des données de qualité de ce capteur.

- **ALOS/PALSAR-2**

En 2014, l'Agence Spatiale Japonaise (JAXA) a lancé un autre capteur appelé PALSAR-2. Les caractéristiques du capteur PALSAR-2 permettent d'avoir des données de qualité supérieure

aux données du capteur PALSAR-1. En effet, en augmentant sa puissance, sa bande passante et en doublant le faisceau des récepteurs, le capteur PALSAR-2 permet d'acquérir des images avec un niveau plus élevé de qualité et une réduction importante des bruits. PALSAR-2 possède une fonction d'apparence droite et gauche. Cette fonction permet d'acquérir plus d'images. Elle n'était pas disponible sur PALSAR-1.

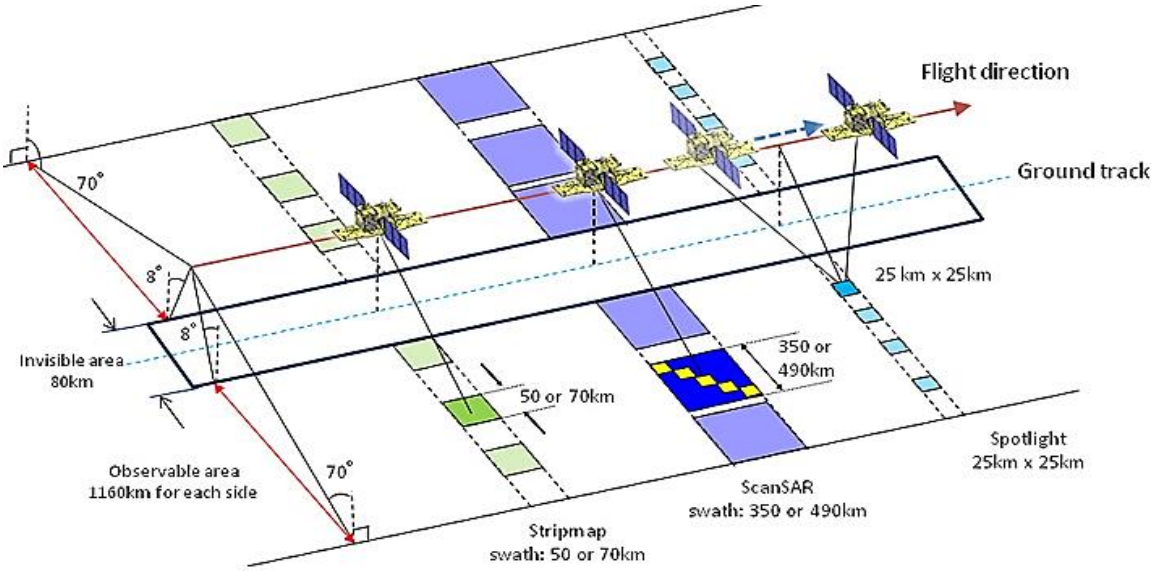


Figure 20:Mode d'acquisition et d'observation du capteur ALOS/PALSAR-2

Tableau 7: Les Caractéristiques du capteur ALOS/PALSAR -2
(http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/about/palsar2.htm)

Mode observation		**Spotlight**	**Stripmap**					**ScanSAR**		
			Ultrafine	High sensitive		Fine		Normal		Wide
Bandwidth (MHz)		84	84	42		28		14	28	14
Resolution (m)		3×1 (Rg×Az)	3	6		10		100 (3 looks)		60
Incidence angle		8-70	8-70	8-70	20-40	8-70	23,7	8-70		8-70
Swath (Km)		25×25	50	50	40	70	30	350		490
Polarization		HH or HV or VV	HH or HV or VV /HH+HV or VV+VH	HH or HV or VV /HH+ HV or VV+VH	HH+HV +VH+VV	HH or HV or VV /HH+ HV or VV+VH	HH+HV+ VH+VV	HH or HV or VV /HH+HV or VV+VH		HH or HV or VV /HH+ HV or VV+VH
NESZ (dB)		-24	-24	-28	-25	-26	-23	-26	-23	-26
S/A (dB)	Rg	25	25	23	23	25	20	25	25	20
	Az	20	25	20	20	23		20		20

Les données ALOS/PALSAR et surtout celles d'ALOS/PALSAR-2 sont importantes pour le suivi des composantes environnementales. Pour les écosystèmes forestiers les données de ces capteurs permettent de :

- mieux rendre compte de la dynamique forestière avec une saturation du signal radar qui apparaît à un niveau de biomasse 3 fois plus élevé qu'en bande C (150 tonnes de matières sèches à l'hectare contre 50 pour un capteur radar en bande C) ;
- faciliter la mise en place d'une méthodologie reproductible de la caractérisation des ressources forestières sur la base de ces images radiométriquement stables ;
- disposer d'images insensibles à la couverture nuageuse et donc d'améliorer l'opérabilité des méthodes développées sur les régions tropicales.

Sur la plateforme http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/dataset_index.htm , la JAXA a mis à la disposition du monde scientifique des mosaïques annuelles et mondiales d'images ALOS/PALSAR (1 et 2) et des produits cartographiques forêt/non-forêt. Ces données sont disponibles en accès libre. Nous avons, dans notre cas et sur certains sites d'étude, utilisé les images ALOS/PALSAR issues de cette mosaïque.

II.3.2.2 Capteur SENTINEL-1 (S-1)

Le système SENTINEL-1 est composé de satellites radar d'observation de la Terre de l'ESA développés dans le cadre du programme *Copernicus*. La mission SENTINEL-1 est basée sur une constellation de 2 satellites : SENTINEL-1A mis en orbite le 3 avril 2014 et SENTINEL-1B mis en orbite le 25 avril 2016 (ESA, 2017). L'objectif du programme est de fournir des données complètes et actualisées permettant d'assurer la surveillance de l'environnement. Ces deux satellites sont en orbite héliosynchrone avec une résolution temporelle de 12 jours à l'équateur pour chaque satellite (ce qui permet d'observer une même zone géographique tous les 6 jours). Les données Sentinel-1 sont diffusées librement via la plate-forme scientifique Copernicus de l'ESA (https://scihub.copernicus.eu/dhus/) ou la plate-forme d'exploitation des produits Sentinel (PEPS) du CNES (https://peps.cnes.fr/rocket/#/). Les images Sentinel-1 sont disponibles selon 3 formats et 2 polarisations (actuellement VV+VH sur nos zones d'étude), voir tableau 8 et figure 21.

- Le format SLC (Single Look Complex) ;
- Le format GRD (Ground Range Detected) ;

Le capteur Sentinel-1 fonctionne dans quatre modes d'acquisition :

- SM : StripMap ;
- IW: Interferometric Wide Swath ;
- EW: Extra-Wide Swath ;
- WV: Wave.

Les polarisations et les bandes utilisées sur chaque site sont décrites dans le chapitre II.

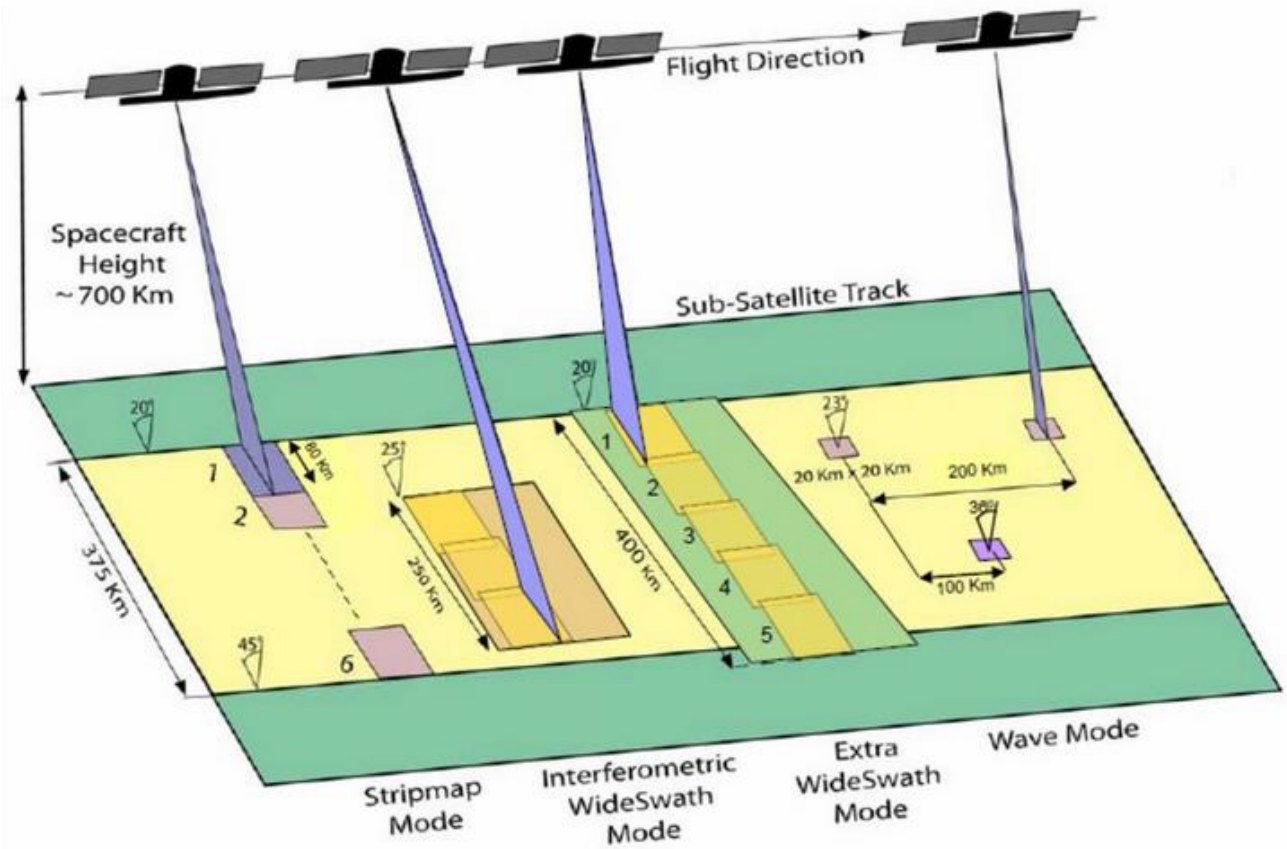


Figure 21: Les différents modes d'observation des satellites sentinel-1 (1A et 1B) (https://dipankar005.wordpress.com/2016/02/07/sar-data-selection-and-differrent-sar-satellites/)

Tableau 8: Caractéristiques de mode d'acquisition des images sentinel-1 (1A/1B) (https://sentinel.esa.int)

Mode	**Incidence angle range**	**Taille du pixel au sol**	**Swath width**	**Polarisation options**	**Maximum Noise Equivalent Sigma Zero (NESZ)**	**Elevation beams**
StripMap	18,3° - 46,8°	5*5	80*80	HH+HV, VH+VV, VV, HH	-22 db	6
Interferometric Wide Swath	29 - 46	5*20	250*250	HH+HV, VH+VV, VV, HH	-22 db	3
Extra-Wide Swath	18,9 - 47	20*40	410*410	HH+HV, VH+VV, VV, HH	-22 db	5
Wave	21,6 - 25,1 / 34,8 - 38	5*5	20*20	HH, VV	-22 db	2
Frequence	5,405GHz / 5,5 cm					
Bande d'acquisition	Bande C					

Sur tous les sites d'étude nous disposons des images Sentinel-1 en polarisation VV+VH en mode IW (Interferometric Wide Swath) avec une taille du pixel au sol ramenée (10 m x10 m), nombre de vues correspond à 4. Des traitements spécifiques sont réalisés sur ces images afin de faciliter l'extraction des informations portant sur l'occupation du sol.

III. Etat de l'Art de la télédétection optique et radar

Plusieurs travaux de recherche ont été menés pour démontrer l'apport des données de télédétection optique et radar pour la cartographie de l'occupation du sol, de la végétation et le suivi des écosystèmes forestiers à différentes échelles spatiales et temporelles. Nous aborderons successivement les études menées avec les données de télédétection optique puis les travaux réalisés avec les données radar.

I III.1 Etat de l'art sur l'utilisation des données de télédétection optique pour l'étude des écosystèmes forestiers

Dans la plupart des études ou travaux scientifiques, l'utilisation des images de télédétection optique s'intéresse à leurs caractéristiques spectrales (Lucas et al 1998, Nelson et al, 2000, Steiniger 2000, Foody et al, 2001). Certaines études font le lien entre la biomasse et les caractéristiques spectrales, surtout par le moyen-infrarouge (Steiniger, 2000) pour cartographier les classes d'occupation du sol, d'autres s'appuient sur des indices de végétation, calculés à partir des bandes spectrales pour la cartographie des végétations ou pour le suivi dans le temps. Avec les bandes de signature spectrale dans le rouge, le proche infrarouge et le moyen infraroug, on calcule les indices comme le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Cet indice est utilisé pour étudier l'activité photosynthétique et chlorophyllienne des plantes, leur densité et la répartition spatiale des espèces (Asner et al 2005 ; Xie et al 2008). En effet la réponse spectrale de la végétation est caractérisée par une faible réflectance dans la bande spectrale du rouge (pic d'absorption de la chlorophylle) et une réflectance beaucoup plus élevée dans le proche infrarouge (Asner et al, 2002). Le domaine du moyen infrarouge (1,5 à 3µ) permet d'estimer les teneurs en eau des surfaces. Ainsi, il est très utilisé pour cartographier les couverts végétaux en état de stress hydrique (Girard et Girard 1999).

D'après Rosillo-Calle (2007), la finesse de la résolution spatiale (taille du pixel) est plus importante que les informations spectrales pour différencier les types de végétations. On peut catégoriser les images optiques en trois catégories : les images de moyenne résolution (images Spot végétation (résolution spatiale = 1Km) ; images MODIS (résolution spatiale = 500 m)), les images de haute résolution (images ASTER résolution spectrale = 60 m ; images LANDSAT TM, ETM+ et OLI, résolution spatiale = 30 m ; images Rapedeye = 6 m ; images SENTINEL-2 résolution spatiale = 10 m ; images Spot-5 résolution spatiale = 2,5 m), les images à très haute

résolution (images spot 6 et 7 = 1,5 m ; images Pleades = 0,7 m). La cartographie d'occupation du sol ou de types de végétation sur de très grandes surfaces à large échelle est très efficace avec les images optiques de moyenne résolution ou haute résolution. Ainsi, ces images s'imposent actuellement comme le meilleur compromis coût-efficacité que ce soit pour la cartographie ou le suivi de l'occupation des sols de grands types de végétation ou plus spécifiquement des types forestiers (Corbane et al 2015). Des cartographies d'occupation du sol et de formations végétales à l'échelle d'un pays ou à l'échelle régionale sont réalisées avec les images LANDSAT TM, ETM+, OLI, (ONF, 2011 ; CCNREDD-Togo, 2013 ; ATLAS-RDC, 2009), à l'échelle régionale et/ou mondiale (Hansen et al 2013).

Cependant, avec les images à moyenne et haute résolution il est difficile de cartographier les éléments linéaires de largeurs réduites comme les mangroves de formes étroites et allongées. Les images à très haute résolution présentent de bons résultats en termes de discrimination des formations végétales et types forestiers et permettent d'obtenir plus de détails comme la différenciation des stades de végétation et compositions (Corbane et al 2015) ou la densité de biomasse (Hussain et al 2013). Les satellites SPOT-6 et SPOT-7 présentent des améliorations majeures au niveau de la résolution spatiale de 1,5 m. Cette importante résolution fait de ce satellite un atout dans la détection des paysages avec des herbacées (Oumar, 2016).

Mais l'utilisation de ces données à très haute résolution présente quelques inconvénients. Les ombres causées par la canopée et la topographie peuvent fausser l'interprétation lors du traitement automatique de ces images. On observe la profusion de détails sur ces images, ce qui peut être un frein dans leur utilisation dans les milieux complexes comme les forêts tropicales humides (DeSy et al 2015, Bartsch et al 2016). Les données issues de haute résolution spatiale sont généralement très lourdes et entraînent souvent des temps de calcul très longs. De plus, la haute résolution spatiale s'accompagne souvent d'un coût prohibitif (Salajanu et Olson. 2001), cela limite leur utilisation pour la cartographie de l'occupation du sol ou la cartographie de formations végétales à une échelle régionale ou continentale. Un autre inconvénient des données de très haute résolution spatiale est qu'elles sont moins riches en terme d'information spectral ce qui limite encore plus leur utilisation (Lu et al ,2004). Cependant malgré ces biais, la très haute résolution spatiale reste un outil très utile pour discriminer les structures forestières complexes.

Il existe plusieurs approches pour extraire les informations en fonction des types d'images optiques et des informations spectrales ou spatiales qu'elles contiennent. Pour les images à moyenne et haute résolution, les traitements concernent les méthodes de classification automatique comme le maximum de vraisemblance sur série-temporelle d'images (Hansen et al, 2013). D'autres méthodes de discrimination des types d'occupation du sol ou de types de

formations végétales ont été développées telle que les « *Support Vector Machine (SVM)* », les « *Random-Forest (RF)* » et les réseaux de neurones (Lardeux et al, 2009). Ces méthodes s'appuient sur l'augmentation importante des capacités de calcul informatique pour améliorer significativement les performances de ces classifications (Ferreira et al 2016). Pour les images à très hautes résolutions, des méthodes bien spécifiques basées sur les algorithmes « *orienté objet (Object-Based Indentification Algorithm) »* ont été développées pour l'extraction des informations, vue la complexité et la finesse des informations qu'elles contiennent. Des méthodes basées sur la texture permettent également de traiter les images de très haute résolution sans segmentation d'objects.

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé les images multi-spectrales à haute résolution spatiale libre d'accès ou open source (LANDSAT et SENTINEL-2) et comme approches de classifications les techniques SVM et RF.

III.2 Etat de l'art sur l'utilisation des données de télédétection RADAR pour l'étude des écosystèmes forestiers

La capacité des ondes radar à pénétrer dans le couvert végétal dépend de leur longueur d'onde selon la bande utilisée (C, L, P, X etc.). Les petites longueurs d'onde (X, C) pénètrent peu le couvert végétal. Les grandes longueurs (L, P) pénètrent plus profondément dans les couverts végétaux et plus spécifiquement les couverts forestiers. L'imagerie radar malgré sa grande diversité (type de bandes, polarimétrie, interférométrie) est moins utilisée pour la cartographie de l'occupation du sol, des formations végétales et le suivi des écosystèmes forestiers. Les utilisations des images radar aboutissent le plus souvent à des résultats de moindre efficacité que pour les imageries optiques (Benelcadi 2012, Corbane et al 2015). Nous allons exposer dans la suite de ce paragraphe quelques études réalisées avec les différents types de données radar. Pour extraire les informations et produire des cartographies d'occupation des sols, des cartes des formations végétales et faire le suivi de ces formations végétales, il existe plusieurs méthodes et approches. Ces méthodes et approches utilisent la polarimétrie, l'interférométrie et l'analyse de texture.

Dans la région de Saint-Pierre au Canada, la cartographie de la végétation en milieu humide a été réalisée à partir des données polarimétriques RADARSAT-2 et ALOS-PALSAR (Gosselin et al, 2013). Lors de cette étude, la décomposition de Touzi a été utilisée afin de caractériser et de classifier les physionomies végétales des milieux humides. Cette méthode est basée sur une exploitation indépendante des composantes polarimétriques, ce qui permet la distinction entre les classes par méthode de seuillage des paramètres de rétrodiffusion. En utilisant les données polarimétriques RADARSAT-2 avec les données Terrasar-X, Fieuzal (Fieuzal, 2013) a estimé les paramètres biophysiques des surfaces agricoles (classe agricole) sur les sites test au «Sud-

Ouest » du CESBIO situé près de Toulouse. Dans cette étude il a montré une très forte complémentarité entre l'approche multi-capteurs et l'approche multispectrale durant le cycle phénologique des cultures étudiées (blé, colza, mais, tournesol, et soja).

Les données interférométriques sont utilisées pour caractériser le couvert végétal et la biomasse (Strozzi et al, 2000). La cohérence interférométrique sert à classifier les types de diffuseurs (Cloude and Pottier, 1997). Floury a également utilisé les données interférométriques pour la discrimination entre les zones de forêt et de non-forêt ainsi que le calcul des paramètres biophysiques des forêts sur la zone des Landes au sud de la France (Floury et al, 1997). Prakoso, 2003 a utilisé la technique de cohérence interférométrique pour cartographier les zones tropicales de la forêt de Tapajõs au Brésil à l'aide des images acquises en bande L et en bande P.

Les images en télédétection offrent un avantage considérable pour le suivi dans le temps des écosystèmes. Les études de suivi des coupes de la canne à sucre (zone de cultures) en utilisant les images satellites Terrasar-X ont été menées par Baghdadi et al. (Baghdadi et al, 2012). Les images satellites Terrasar-X multi-temporelles utilisées dans ces études ont été acquis à différents angles d'incidence (31°, 37°, 47°) et polarisations (HH, HV, VV) sur la région de l'ile de la Réunion. Cette étude en terrain plat a montré que le signal radar rétro diffusé augmente rapidement avec la hauteur de la canne jusqu'à une hauteur de seuil, qui dépend de l'angle d'incidence et de la polarisation.

Pour le suivi des zones agricoles d'autres études ont été réalisées. C'est le cas des études d'Inoue et al, Guerriero et al, Hosseini et al. Inoue et al ont étudié les paramètres de rétrodiffusion en bande C pour la culture du riz et ont montré l'importance du signal radar rétrodiffusé pour l'évaluation des paramètres LAI et FAPAR afin de suivre la croissance du riz (Inoue et al, 2014). Guerriero et al ont utilisé la rétrodiffusion radar en polarisation VV, HV et HH en bandes L et C par le modèle TOV pour prédire le coefficient de diffusion bi-statique des cultures (Guerriero et al, 2013). Hosseini et al ont utilisé les données polarimétriques en bande C et L afin d'estimer le paramètre LAI des cultures du maïs et de soja.

Avec les nouvelles données radar Sentinel-1 de l'ESA disponibles gratuitement, avec une large couverture, une résolution fine et avec une grande profondeur temporelle, plusieurs travaux de recherche et études ont été entrepris. C'est le cas de Frison et al, pour montrer la saisonnalité plus marquée avec une amplitude d'environ 5 db en étudiant le rapport des polarisations VV et VH des données Sentinel-1 (Frison et al. 2017). Les résultats de l'étude de Frison et al montrent que le signal de la végétation croît au début du mois de mars dans la forêt de Fontainebleau et reste élevé jusqu'en septembre, puis décroît à partir de fin septembre pour retrouver son niveau minimum fin novembre. On retrouve une certaine corrélation entre ces résultats et la valeur de

NDVI calculée sur la zone avec les données d'imagerie optique. Ainsi, à partir de ces résultats, on peut conclure que la variation du rapport de la polarisation est liée à la période d'activité photosynthétique (HV étant sensible à la végétation) Torbick et al, 2017 ont aussi utilisé le coefficient de rétrodiffusion radar de la série Sentinel-1 pour le suivi de la culture du riz pour cartographier l'étendue des zones de rizières en Birmanie en Asie du Sud-Est, leur calendrier cultural, leur période d'inondation ainsi que leur intensification de cultures (Torbick et al, 2017). Bouvet (Bouvet, 2016) a montré qu'il est possible de faire la surveillance des forêts sujettes au déboisement ou à la déforestation à partir du suivi temporel du coefficient de rétrodiffusion radar en bande C en polarisation croisée (Bouvet, 2016). Pathier et al ont montré également l'intérêt de la haute résolution spatiale et la haute fréquence d'acquisition de la série Sentinel-1 SLC. En effet, le passage de 12 à 6 jours améliore significativement la qualité du signal dans les zones à faible cohérence. En conséquence, avec la combinaison Sentinel-1A et Sentinel-1B la résolution spatiale sera plus significative.

D'une manière plus générale, le radar présente un réel intérêt dans la discrimination des milieux ouverts et des milieux humides du fait de la sensibilité du signal rétrodiffusée à la rugosité et à l'humidité (Hess et al 2015). La présence de l'humidité du sol influe sur le signal radar (Ulaby et al, 1986)**.** Cette sensibilité diminue lorsque l'angle d'incidence augmente (Dissanska et al 2009).

Partie I :

Chapitre II : Descriptions des sites d'étude et données utilisées

Sommaire

Introduction

I. Écosystème du Paysage des Virunga
- I.1. Localisation géographique
- I.2. Caractéristiques physiques
- I.3. Diversité biologique du paysage de Virunga
- I.4. Problématiques traitées et données utilisées

II. Réserve de biosphère du Complexe d'Oti – Keran – Mandourie (OKM)
- II.1. Localisation géographique
- II.2. Caractéristiques physiques
- II.3. Diversité biologique de l'OKM
- II.4. Problématiques traitées et données utilisées

III. Réserve de faune de Togodo (RFT)
- III.1. Localisation géographique
- III.2. Caractéristiques physiques
- III.3. Diversité biologique du RFT
- III.4. Problématiques traitées et données utilisées

IV. La Plaine littorale de Kourou en Guyane française
- IV.1. Localisation géographique
- IV.2. Caractéristiques physiques
- IV.3. Diversité biologique
- IV.4. Problématiques traitées et données utilisées

V. La zone frontalière de saint George de l'Oyapock en Guyane française
- V.1. Localisation géographique
- V.2. Caractéristiques physiques
- V.3. Diversité biologique
- V.4. Problématiques traitées et données utilisées

VI. Les forêts tropicales sèches de la Caraïbe : République Dominicaine
- VI.1. Localisation géographique
- VI.2. Caractéristiques physiques
- VI.3. Diversité biologique de la province de Monté-Cristi
- VI.4. Problématiques traitées et données utilisées

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les différents sites d'étude. Ces sites se situent dans des écosystèmes forestiers de natures différentes : tropicaux humides et tropicaux secs. Il s'agit de:

- l'écosystème du Paysage des Virunga en République Démocratique du Congo (RDC) (Climat tropical humide) ;
- la réserve de biosphère du complexe d'Oti – Keran – Mandourie (OKM) au nord Togo (Climat tropical sec) ;
- la réserve de faune de Togodo (RFT) au sud Togo (Climat tropical sec) ;
- le littoral de la zone de Kourou en Guyane française (Climat tropical humide) ;
- la zone fronteleire entre la Guyane française et Brésil autour du pont de Saint-Georges de l'Oyapock (Climat tropical humide) ;
- la zone écosystème forestier de la Caraïbe au nord Est de Saint-Domingue, province de Monté Cristi (Climat tropical humide).

Le choix des régions géographiques repose sur les données satellitaires disponibles et exploitables sur chacune d'elles. Il repose également sur les données annexes dont nous disposons et la possibilité d'accéder au terrain pour la validation des résultats. Ces sites ont été choisis aussi pour l'intérêt des thématiques qui y sont traitées.

Nous allons pour chaque site d'étude décrire successivement la localisation géographique, les caractéristiques physiques et les données utilisées.

Ce préambule a aussi pour but d'introduire des éléments de base utiles pour la suite des travaux.

I. Écosystème du Paysage des Virunga

L'écosystème naturel du paysage des Virunga a subi plusieurs agressions d'origines diverses. Les menaces sur la conservation de la biodiversité dans cette région sont, principalement, l'agriculture itinérante sur brûlis, le braconnage, l'absence d'aménagement et d'affectation des terres. La surexploitation du bois à des fins industrielles et de bois d'énergie entraîne l'accélération du rythme de déforestation. Les dégradations qui résultent de ces divers facteurs ont été amplifiées du fait des différents conflits armés qui ont affecté la région depuis les années 1990. Nous allons présenter le paysage de Virunga sur lequel nous allons étudier l'impact de ces conflits armés sur l'évolution des ressources naturelles forestières.

I.1. Localisation géographique

Le paysage des Virunga est localisé entre 1°1'29'' latitude Nord 1°44'21'' latitude Sud et 28°56'11'' et 30°5'2'' longitude Est et couvre 1515500 ha. Il s'étend le long des frontières de

la RDC, du Rwanda et de l'Ouganda. Il comprend plusieurs aires protégées, notamment : le parc national des Virunga (772700 ha), le parc national des Volcans (16000 ha), une bande de 10 km de large le long de ces parcs, la réserve de Sarambwe (900 ha) et le domaine de chasse de Rutshuru (64200 ha) (Vanden Weghe et al, 2007).

Le parc national de Virunga (PNVi) est l'élément principal au cœur de ce « *paysage des Virunga* ». Il a été le premier parc national créé en Afrique en 1925 par le gouvernement de la RDC. Il fut déclaré Site du Patrimoine Mondial de l'UNESCO en 1979 et Zone Humide d'Importance Internationale Ramsar en 1996. (http://www.fws.gov/international). L'objectif de sa création fut, d'une part, d'assurer la sauvegarde des gorilles de montagne dans les montagnes des Virunga mais aussi de protéger l'extraordinaire habitat naturel de la faune et de la flore d'Afrique. En effet, il est le parc africain le plus diversifié biologiquement.

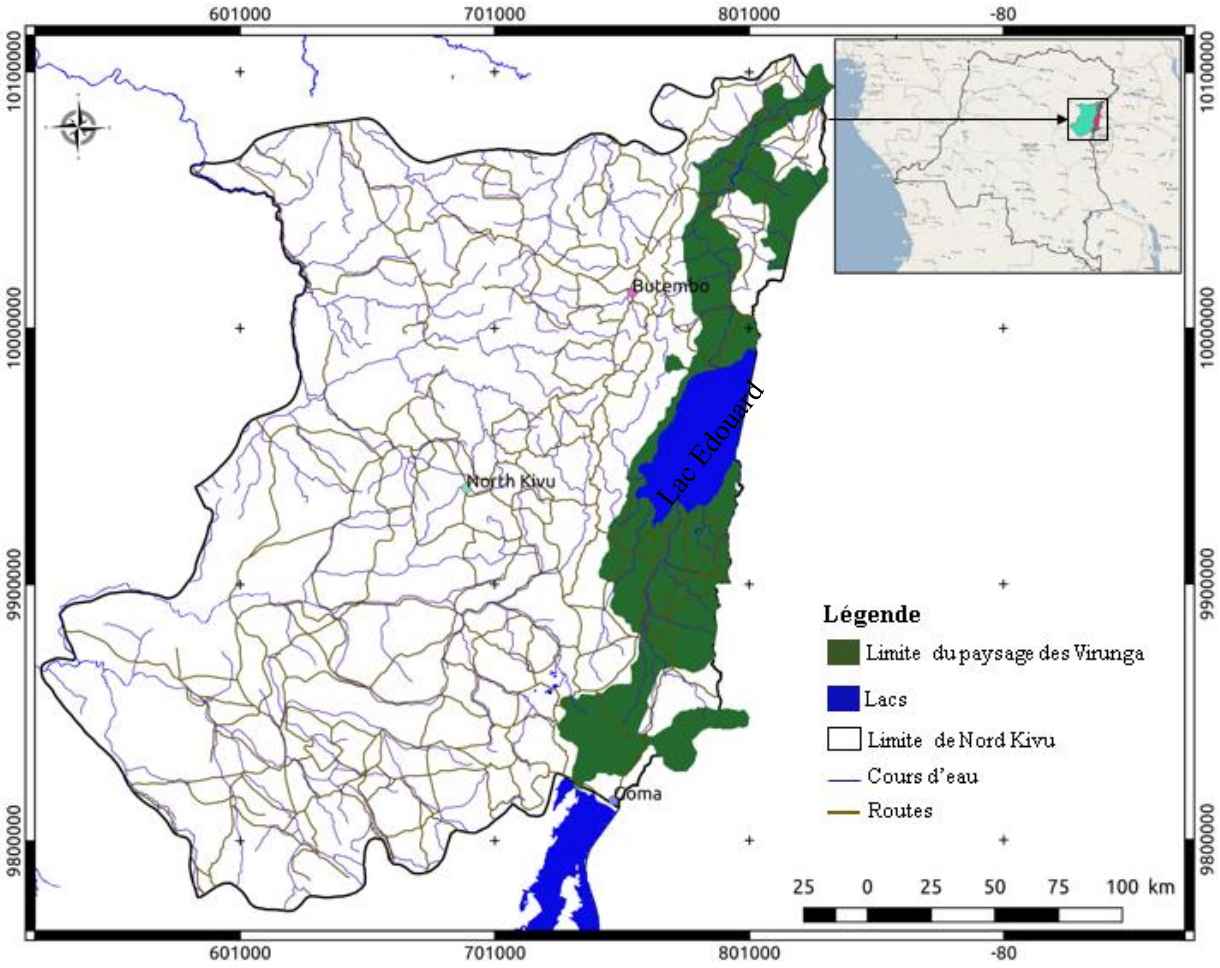


Figure 22:Localisation de l'écosystème du paysage de Virunga

Le *paysage des Virunga* englobe les populations humaines qui interagissent directement ou indirectement avec l'espace naturel. Le paysage présente l'une des densités de population les plus élevées du continent, avec plus de 600 hab/km². Cette population très dense utilise les

savanes et les forêts des parcs pour l'obtention de bois de feu, de matériaux de construction ; le défrichement agricole est une autre cause de dégradation.

I.2. Caractéristiques physiques

I.2.1. Climat

Les paramètres climatiques (les précipitations, temperature etc.) sont bimodaux avec deux saisons des pluies centrées en octobre-novembre et avril-mai et deux saisons sèches centrées en janvier et juillet. La pluviométrie et les températures varient toutefois énormément en fonction de l'altitude et du relief (la température moyenne décroît de 0,6C°/100 m d'élévation en altitude). Les gradients sont par endroits très abrupts. Les plaines au sud du lac Edouard sont chaudes et reçoivent moins de 1000 mm de précipitations par an en moyenne, tandis que celles entre les volcans Karisimbi, Mikeno et Bisoke reçoivent plus de 2000 mm à 3000 m d'altitude (figure 24). Les flancs du mont Ruwenzori sont également très pluvieux, tandis que les plus hauts sommets, au-dessus de 4000 m, sont secs (la pluviométrie au sommet du Karisimbi est estimée à 800 mm/an en moyenne). Localement, il existe des effets de brouillard qui accentuent la pluviométrie. Au-dessus de 3500 m, les gelées nocturnes sont fréquentes (Fishpool et Evans, 2001).

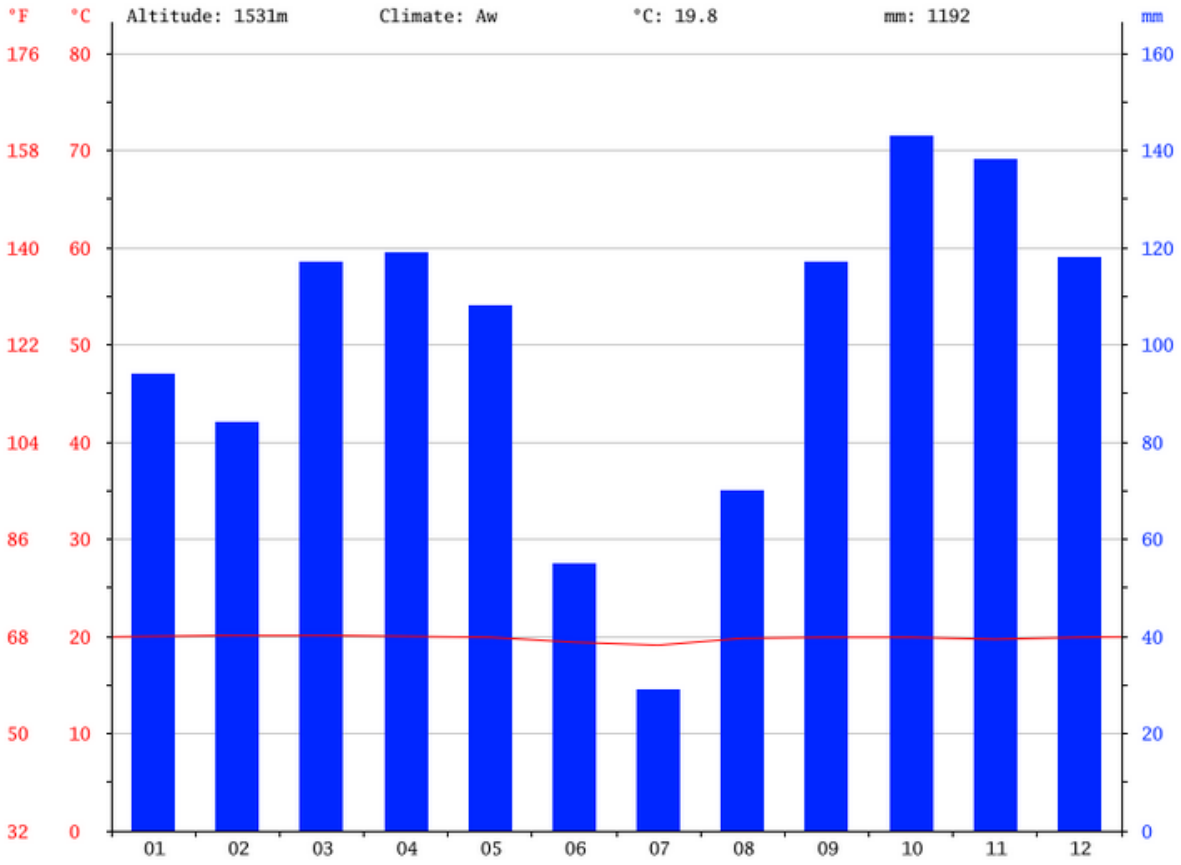


Figure 23: Courbe ombrothermique de la station de Goma (Source : station météorologique de Goma et https://fr.climate-data.org/location/1074). Les données sont collectées sur une durée de 30 ans pour la construction de cette courbe ombrothermique.

I.2.2. Relief

Le relief de la province du Nord- Kivu est très accidenté. Les altitudes varient de moins de 800 m à plus de 5000 m. *Le Paysage des Virunga* est centré sur le fossé central du rift Albertin occupé par le lac Edouard et de vastes plaines qui s'étendent entre 680 et 1450 m d'altitude. Sa limite ouest s'étire tout au long du versant oriental abrupt de la chaîne montagneuse des Mitumba qui forme le bourrelet occidental du rift. Au nord-est, il comprend le versant occidental du horst du Ruwenzori avec ses glaciers actifs dont le sommet culmine à 5119 m et dont le relief très escarpé comprend de nombreuses anciennes vallées glaciaires. Au sud, sur la frontière entre la RDC et le Rwanda, il comprend les Virunga, une série de huit volcans centraux entourés d'innombrables volcans adventifs qui émergent d'un vaste plateau de laves. Le volcan le plus élevé, le Karisimbi, culmine à 4500 m (De Wasseige, et Denvers, 2011).

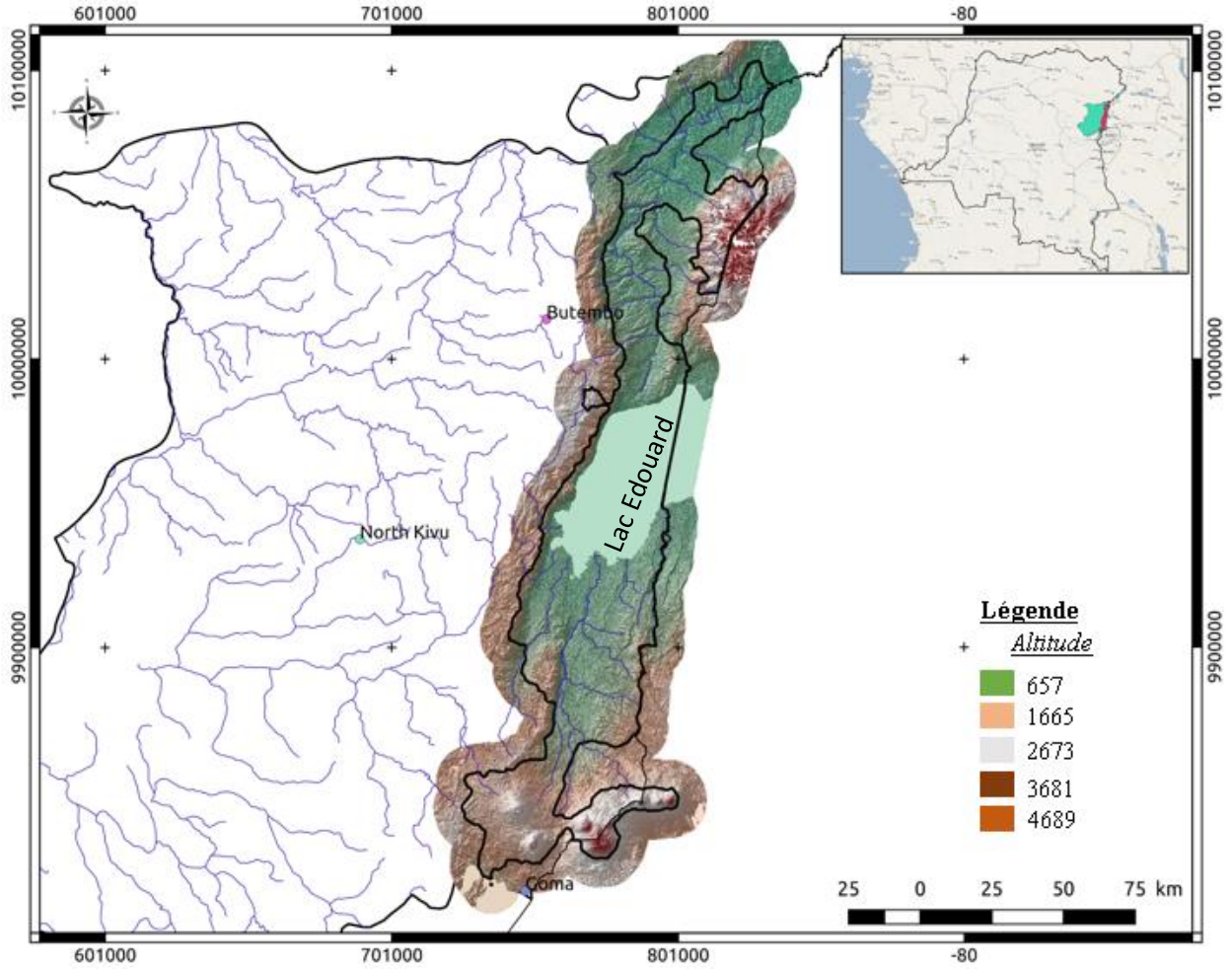


Figure 24: Représentation du relief du paysage du paysage des Virunga (élaborée par Kemavo)

I.2.3. Géologie et Sols

Les montagnes de la frange ouest du Paysage sont constituées de roches métamorphisées d'âge protérozoïque. Le Ruwenzori est un bloc de roches très métamorphisées (principalement des gneiss) qui a été basculé et soulevé au milieu du fossé tectonique, séparant celui-ci en deux

branches: celle de la Semliki dans l'axe du rift et celle du lac George plus à l'est (De Wasseige, et Denvers, 2009).

Les plaines au nord et au sud du lac Edouard sont constituées d'alluvions quaternaires, qui donnent des sols sableux ou argilo-sableux. Les formations volcaniques les plus anciennes datent du Miocène (12 millions d'années); les plus récentes sont actuelles. Ces formations volcaniques donnent des sols très perméables, incapables de retenir l'eau mais extrêmement fertiles. On pourrait subdiviser ces sols en trois grandes catégories:

- *les sols volcaniques récents :* provenant des coulées de lave de volcan. Les coulées récentes ne permettent pas encore à l'agriculture de s'y installer ; tandis que dans les coulées plus anciennes, la lave est particulièrement décomposée et forme un sol parfois encore superficiel mais très fertile. Ces sols se retrouvent entre les villes de Goma et Rutshuru ;
- *les sols des plaines alluviales :* ces sols se retrouvent dans les plaines de la Semliki et proviennent des dépôts lacustres de la rivière Semliki et de ses affluents ;
- *les sols des roches anciennes :* ces sols sont très profonds et riches en humus. Ils sont assez argileux, peu compacts et disposent, en surface, d'une importante réserve de matières organiques.

I.2.4. Réseau hydrographique

La région des volcans possède très peu de cours d'eau, mais la majeure partie du sud du Paysage des Virunga est drainée vers le lac Edouard (215 000 ha de surface et une profondeur de 30m) par les rivières Rwindi, Ishaha et Rutshuru. Du lac Edouard, les eaux sont drainées vers le lac Albert via la Semliki, qui reçoit aussi les eaux des Mitumba et du flanc ouest du Ruwenzori, et ensuite vers le Nil Blanc. En dehors du lac Edouard, *le Paysage des Virunga* comprend, au Rwanda, les lacs Bulera et Ruhondo, des lacs de haute altitude formés par le barrage de hautes vallées suite à des éruptions volcaniques, ainsi que la rive nord du lac Kivu en RDC. Ces lacs appartiennent également au bassin du Nil via la rivière Akagera. Seules les rives du lac Kivu et les quelques ruisseaux qui se jettent dans ce lac appartiennent au bassin du Congo.

I.3. Diversité biologique du paysage de Virunga

Le paysage de Virunga est trés diversifié en faune et en flore. Cette diversité remarquable se retrouve essentiellement dans le PNVi faisant de ce parc un patrimoine mondial de l'UNESCO. De par son étendue, son relief accidenté et sa position géographique à cheval sur l'équateur et en zone de transition entre deux grandes régions biogéographiques (Guinéenne et Soudano-Zambézienne), le paysage de Virunga possède une végétation extrêmement variée. Cette végétation variée comprend les formations suivantes:

- *Les types de savane* : les savanes herbeuses, les savanes arbustives et arborescentes à *Acacia* et *Combretum*, les savanes à bosquets xérophiles et les savanes boisées dominantes dans la partie centrale du Paysage entre les villes de Rutshuru et Beni ainsi qu'autour du lac Edouard ;
- *Les formations forestières :* Les forêts et fourrés sclérophylles, les forêts xérophiles à *Euphobia dawei* et *Olea europea*, les forêts sub-montagnardes et montagnardes avec des formations à *Podocarpus*, à *Hagenia* et *Hypericum* et des fourrés de bambou *Synarundinaria alpina*, limitées aux flancs du Ruwenzori au nord-est et aux volcans au sud ; les landes et les fourrés de haute altitude a Ericaceae (Philippia benguelensis, Philippia johnstoni, Erica arborea, Erica kingaensis) ; les forêts dégradées et les cultures généralement installée en lisière des aires protégées.
- Les zones marécageuses des bords du lac Edouard.

Dans le parc national des Virunga, ont été recensées 2077 espèces de plantes dont 627 espèces herbacées, 126 espèces de lianes et 107 espèces d'arbres. Parmi ces espèces plus de 230 sont endémiques aux montagnes du rift Albertin (Plumptre et al. 2003).

La grande variété des écosystèmes ou des biotopes du paysage de la Virunga se traduit par une grande diversité de faune. En effet on dénombre plus de 210 espèces de mammifères parmi celles-ci 21 sont endémiques au rift Albertin, notamment le potamogale du Ruwenzori *Micropotamogale ruwenzori* et le gorille de montagne *Gorilla beringei beringei*. On retrouve également parmi les espèces importantes et plus largement distribué l'éléphant *Loxodonta africana*, l'hippopotame *Hippopotamus amphibius*, le chimpanzé *Pan troglodytes*, le cercopithèque de l'Hoest's *Cercopithecus lhoesti*, le cercopithèque de Hamlyn *Cercopithecus hamlyni* et l'hylochère Hylochoerus meinertzhageni, le buffle (Syncerus caffer), une variété d'antilopes (Kob, Waterbuck, Topi), phacochères, lions. On retrouve également dans la chaîne des volcans éteints, l'Okapis *Okapia johnstoni*, espèce endémique de la région, le Bongo *Tragelaphus euryceros* et l'Hylochère Hylochoerus meinertzhageni dans les forêts ombrophile à l'extrême nord du paysage.

Le paysage de Virunga est particulièrement diversifier en avifaune, on compte 706 espèces dont 25 sont endémiques du rift Albertin. La plupart de ces endémiques sont des espèces forestières, notamment le bagadais d'Albert *Prionops alberti*, la grive du Kivu *Zoothera tanganjicae*, le sénégali de Shelley *Cryptospiza shelleyi* et le souimanga de Stuhlmann *Nectarinia stuhlmanni*. D'autre espèce d'oiseaux vivent dans la végétation de haute altitude notamment le souimanga de Johnston *Nectarinia johnstoni* et une espèce, la bouscarle de Grauer Bradypterus graueri, habite uniquement les marais de haute altitude à Cyperaceae. Le gonolek des papyrus Laniarius

mufumbiri, inféodé aux papyrus, est un endémique de la région du lac Victoria (Fishpool et Evans, 2001). Enfin, les milieux humides du Paysage sont aussi importants pour les populations migratrices de certains oiseaux paléarctiques, notamment beaucoup de limicoles et la guifette leucoptère *Chlidonias leucopterus.*

I.4. Problématiques traitées et données utilisées

Nous allons analyser l'impact des différents conflits armés dans la zone (sur les 30 ans dernières années, tous les 10 ans à partir de 1985) sur les ressources naturelles. Pour ce faire nous avons utilisé différentes sources de données.

I.4.1. Les données optiques

Les images optiques utilisées proviennent des capteurs Sentinel-2 et Landsat (pour la description des capteurs voir II.3.1.1 et II.3.1.2). L'annexe 1 montre la liste des images utilisées. La figure 25 illustre les emprises des images utilisées. Les images sélectionnées comportant une couverture nuageuse réduite (entre 0 et 30 %) sur l'ensemble de la scène de l'image et pas du tout de nuage sur la zone étudiée.

I.4.2. données de référence

Les données de référence utilisées sur le site du paysage de Virunga sont :

- une carte topographique de 1/50000 de la province du nord Kivu en RDC ;
- une carte d'occupation du sol avec 32 classes et 8 classes produites en 2015 (ESA, 2016) ;
- un modèle Numérique de terrain (MNT) SRTM à 30 m ;
- des point GPS de terrain avec des photographies géo-référencées obtenues dans le cadre de mission de terrain réalisée en Juin 2015 (UPEM-ONFI) et en Avril 2018 (ONF).

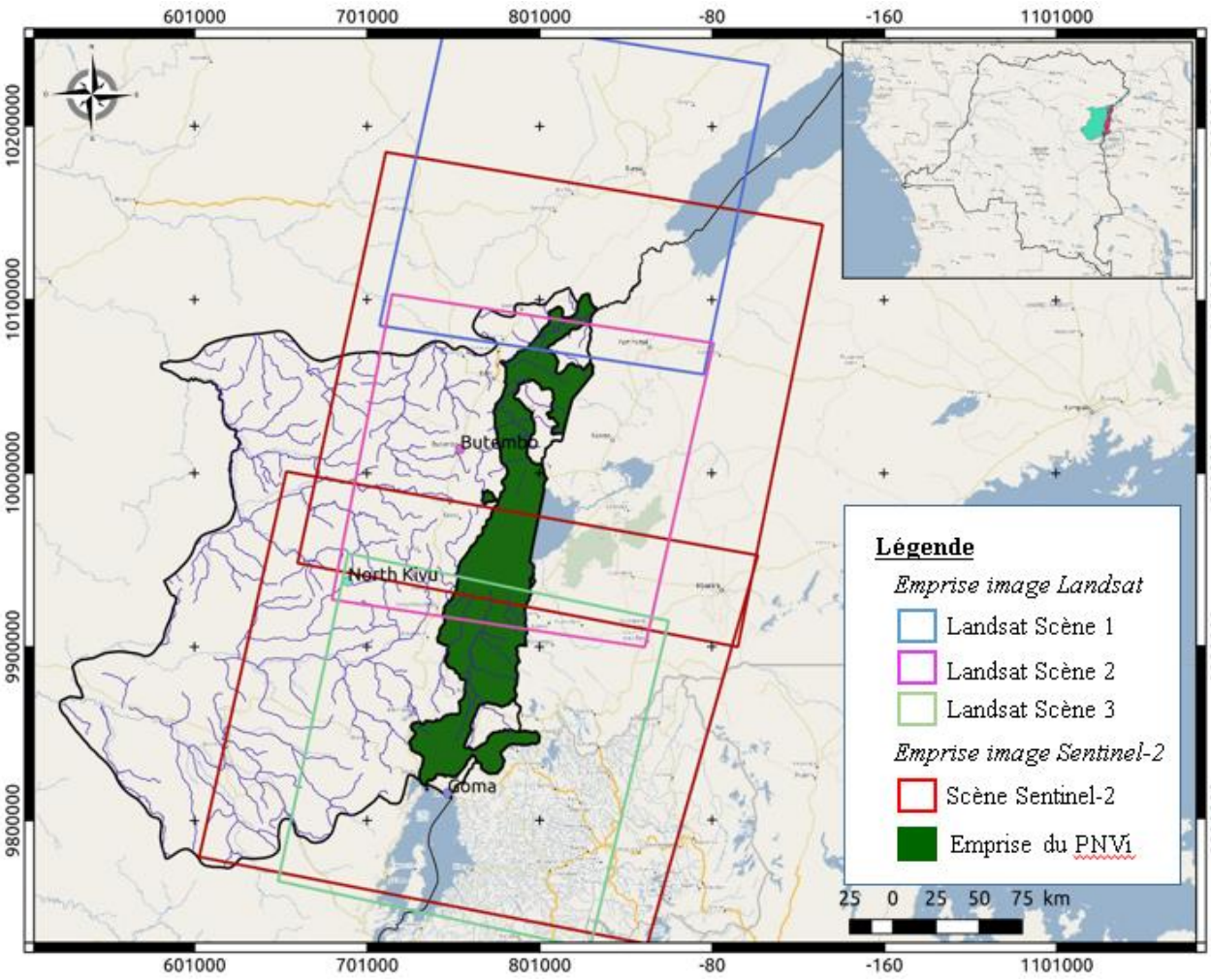


Figure 25: Emprise des extraits d'images optiques (Sentinel-2 et Landsat) sur la zone du Paysage des Virunga

II. Réserve de biosphère du Complexe d'Oti – Keran – Mandourie (OKM) au Togo

Au niveau de la réserve de biosphère de l'OKM, nous allons évaluer la contribution des reliques forestières dans la séquestration de carbone. Ces reliques forestières sont situées autour des cours d'eau et sont les seuls écosystèmes forestiers qui restent dans la région des savanes du Togo. L'objectif est d'évaluer la contribution de ces forêts dans la stratégie de réduction des émissions de gaz à effet de serre dues à la déforestation et à la dégradation (REDD+).

II.1. localisation géographique

Le complexe d'OKM résulte du regroupement de deux aires protégées : l'aire protégée d'Oti-Kéran et l'aire protégée d'Oti-Mandouri. La Réserve de Biosphère du Complexe OKM est située dans la partie septentrionale du Togo à cheval sur deux régions du pays à savoir la région des Savanes et la région de la Kara. Elle est localisée dans les zones éco floristiques I et II du pays. Elle a une superficie de 179000 ha et se situe entre 9°55' et 11° latitude Nord et entre 0°25' et 1° longitude Est (Figure 26). La réserve de biosphère est gérée par la direction des

ressources naturelles du Ministère de l'Environnement et des Ressources Forestières (MERF) du Togo. La direction régionale de l'environnement des deux régions (la région des savanes et la région de la Kara) assure la mise en œuvre des plans d'action de la zone de la réserve de biosphère.

Cette réserve a été créée dans le souci de (1) maintenir une connectivité des couloirs transfrontaliers entre l'aire protégée d'Oti-Kéran et le complexe WAP (Complexe de reserve transfrontier composé de trois reserve, la reserve de W, la reserve de Arly, le parc de Pendjari) d, (2) faciliter le déplacement saisonnier des éléphants dans leur aire de répartition en l'Afrique de l'Ouest (Kemavo, 2013). Cette zone a reçu le label de réserve de biosphère en 2011 delivré par l'UNESCO dans le but de concilier la conservation des ressources naturelles et le développement durable, en mettant un accent particulier sur les besoins primaires de la population riveraine (Agriculture, élevage et consommation des produits forestiers non ligneux).

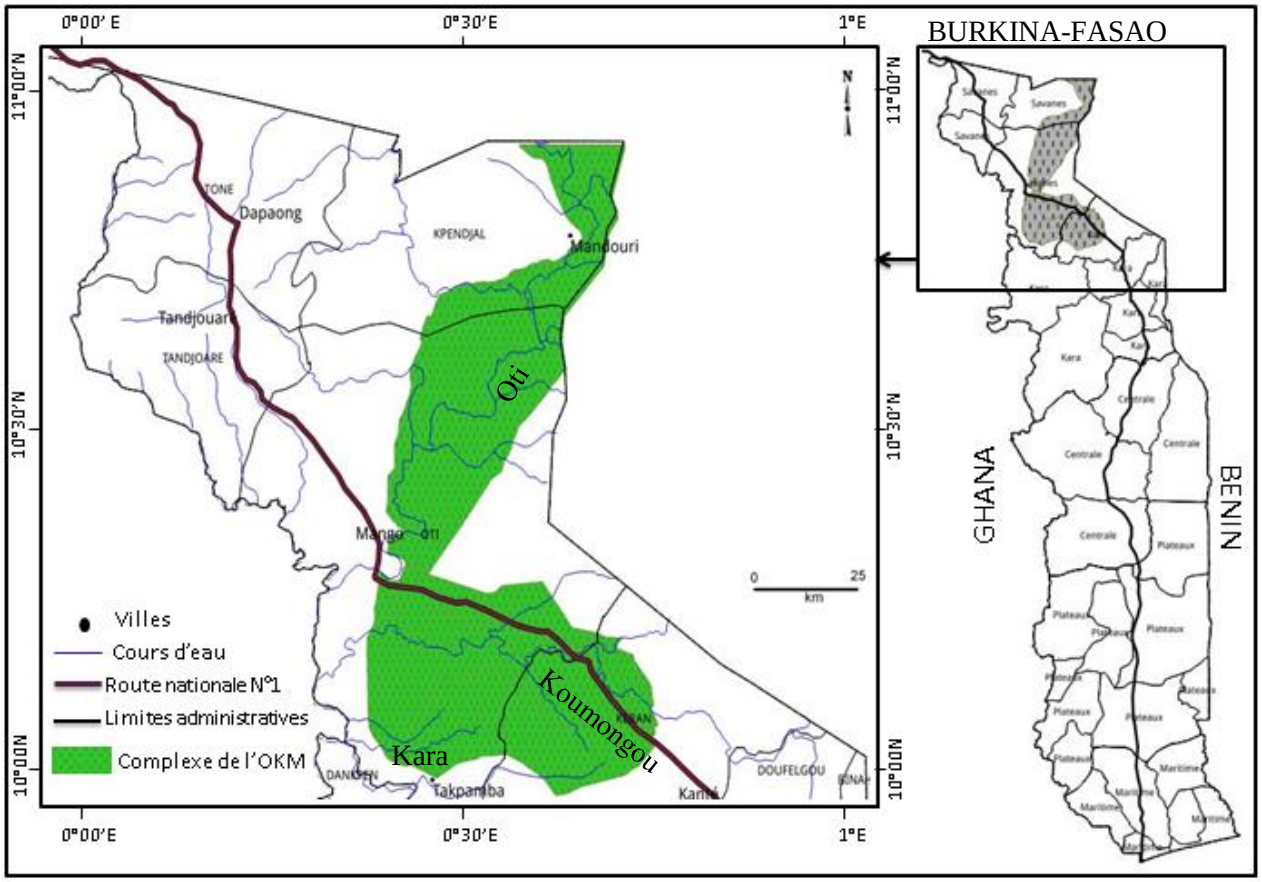


Figure 26:Localisation de la réserve de biosphère du complexe de l'OKM

II.2. Caractéristiques physiques

II.2.1 Climat

Le Complexe OKM appartient à la zone soudanienne et jouit d'un climat tropical à saison sèche marquée. Ce climat est caractérisé par deux saisons : une saison pluvieuse de 6 mois s'étendant

d'avril à octobre et une saison sèche de 6 mois qui va de novembre à mars marquée par l'harmattan (un vent sec et chaud). L'écosystème de la réserve de biosphère du Complexe OKM a été façonné par les éléments climatiques suivants :

- *les températures* **:** la température moyenne mensuelle varie entre 24,7°C et 31,7°C. Les extrêmes thermiques sont en moyenne d'un minimum de 18,1°C en décembre et d'un maximum de 38,7°C en mars. L'amplitude thermique quotidienne est faible (entre 6 à 7°C). Les mois de mars et avril sont les mois les plus chauds au cours desquels on enregistre souvent les températures maximales de l'année (>30°C). Le mois d'août constitue le mois le plus froid avec des nuits très fraîches (dans le contexte togolais) au cours desquelles les températures se situent souvent autour de 20° C (Figure 27 et 28) ;
- *les précipitations* : la pluviométrie moyenne varie entre 800 et 1000mm au niveau de la station de Mango et la station de Kanté. Les maximums de pluie sont enregistrés au cours des mois de juillet à septembre avec le pic atteint au mois d'août. Ces mois correspondent à la période où la mousson souffle sur toute la région de la savane et la région de la Kara. Les mois de décembre, janvier et février sont les mois les plus secs (respectivement 1,19 mm, 0,71 mm et 0,74 mm de pluie) au cours desquels on note surtout l'effet desséchant de l'harmattan (vent très sec) (Figure 27 et 28);

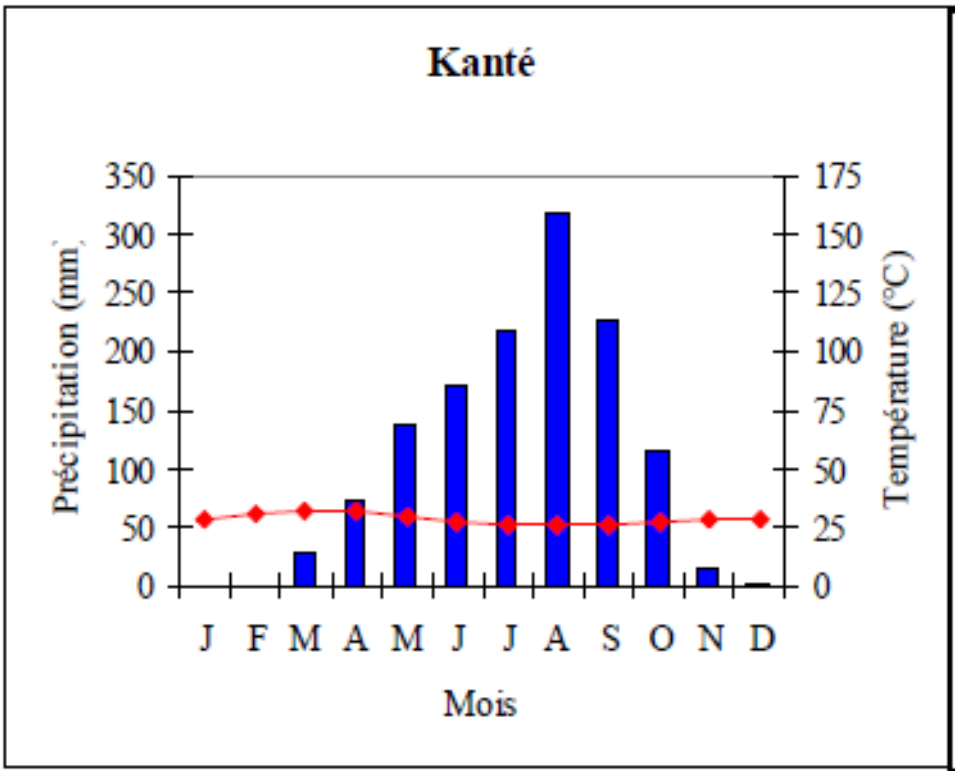


Figure 27: Courbes Ombro-thermiques de la station de Kanté (Source : Direction de la météorologie nationale de Kanté au Togo, les données sont collectées sur la station de Kanté sur une durée de 30 ans)

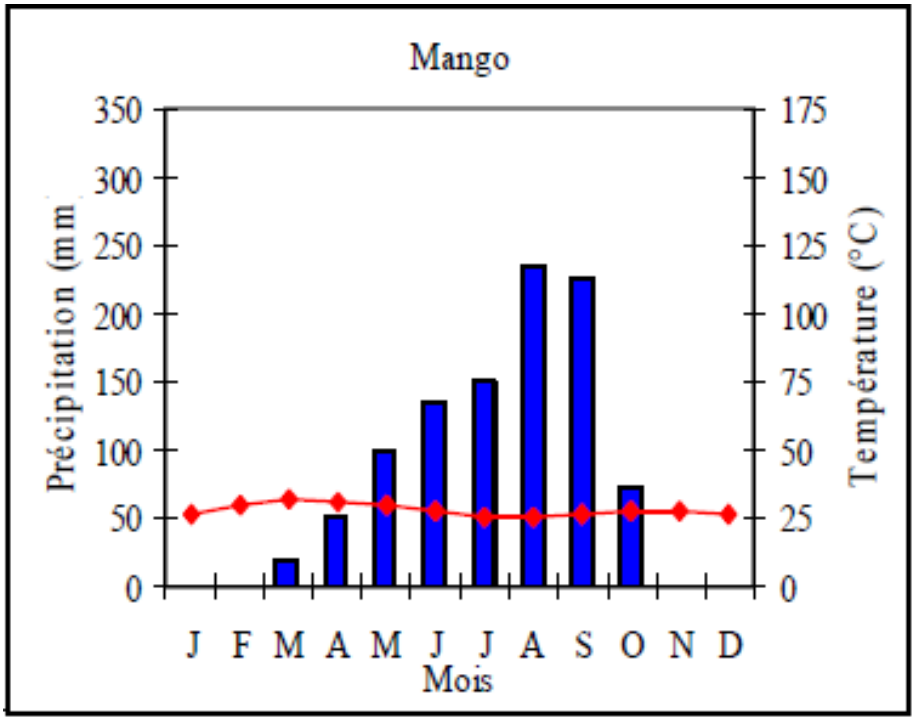


Figure 28: Courbes Ombro-thermiques de la station de Mango (Source : Direction de la météorologie nationale de Mango au Togo, les données sont collectées sur la station de Mango sur une durée de 30 ans)

II.2.2. Relief

Le relief du complexe de l'OKM est du même type que celui de la région des savanes du Togo **(Figure 29).** Ce relief est très peu accidenté avec des pentes très faibles et est composé de deux ensembles :

- la plaine de l'Oti ;
- le plateau de Dapaong.

La partie septentrionale du plateau de Dapaong fait partie d'une vaste pénéplaine qui se prolonge au Burkina Faso et s'élève à environ 230 m au-dessus du niveau de la mer. Cette pénéplaine se transforme en un relief de cuestas au sud de la ligne Dapaong-Kantindi. Les cuestas s'inclinent vers le sud en formant dans la région des savanes deux zones de collines hautes et abruptes. La cuesta la plus nordique culmine à 300 m et coupe comme une véritable muraille. Ce relief de cuestas s'estompe vers le sud dans la plaine de l'Oti qui se trouve à 130 m au-dessus du niveau de la mer.

II.2.3. Sol

Les sols de la région de l'Oti présentent différentes variantes. Selon la description de Poss (Poss, 1996) on distingue les types de sols suivants :

- *les sols ferrugineux hydromorphes régulièrement saturés en eau*: on les retrouve le plus souvent en bas de versant, sur les plaines alluviales et parfois sur les plateaux cuirassés,

on ne retrouve pas souvent d'affleurement de cuirasses et de blocs à la surface de ces sols. La surface est couverte de turricules de vers souvent groupés en édifices;

- *les sols ferrugineux tropicaux indurés à concrétions:* Ce sont les sols les plus abondants des plateaux, les termitières peuvent être présentes ou non sur ces types de sols, la surface du sol présente quelques fois des turricules de vers;
- *les sols ferrugineux tropicaux à concrétions non indurés:* on les retrouve sur les plateaux et plus précisément sur les altérations ferrugineuses des grès et parfois sur des hauts de versant. La surface du sol ne présente pas souvent de blocs ni d'affleurements de cuirasse, les termitières ne sont pas fréquentes mais on note quelquefois la présence de turricules de vers.

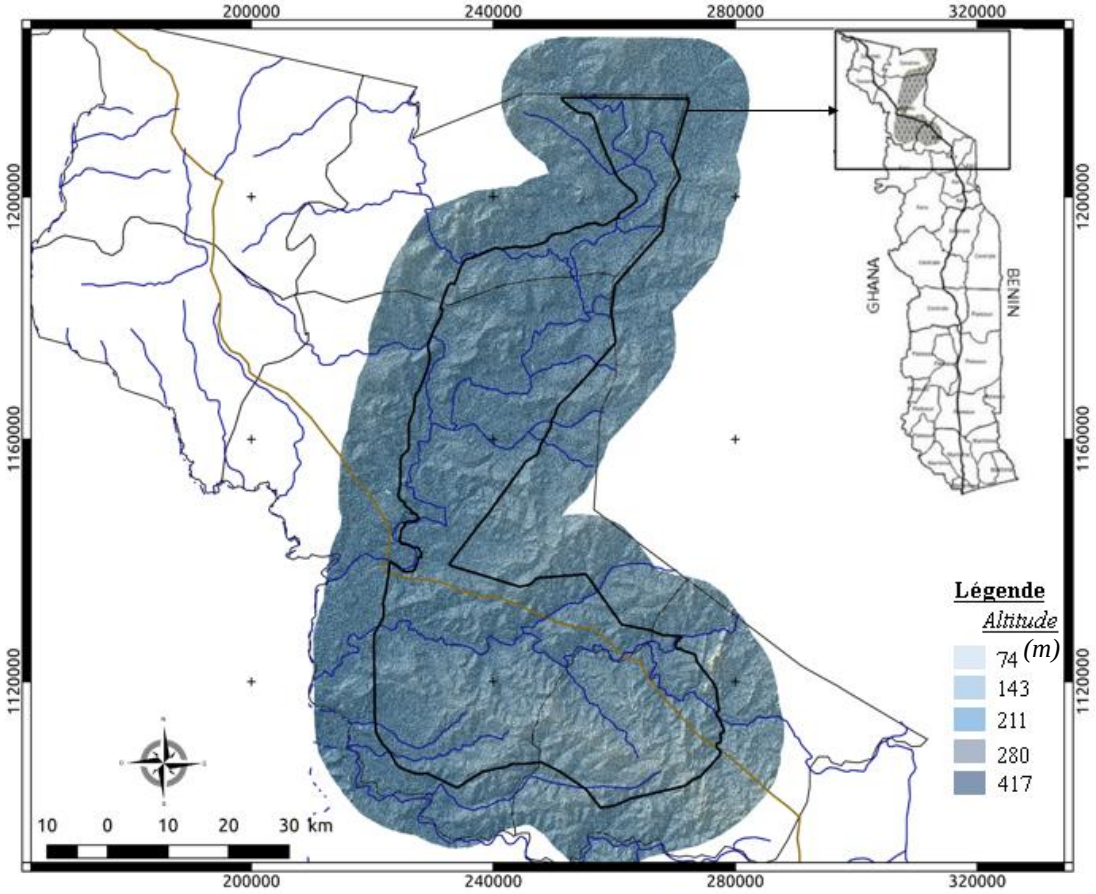


Figure 29:Représentation du relief de l'OKM (élaborée par Kemavo)

II.2.4. Réseau hydrographique

La réserve de biosphère de l'OKM est très bien drainée. Trois grands cours d'eau et leurs affluents alimentent l'ensemble du réseau hydrique :

- le fleuve de l'Oti au Nord et à l'Ouest avec 167 km ;
- la rivière Koumongou ou Kéran dans la partie centrale ;
- la rivière Kara au Sud.

La réserve de biosphère du complexe de l'OKM renferme des écosystèmes humides riches en espèces aquatiques qui lui confèrent aussi une reconnaissance internationale comme site RAMSAR.

II.3. Diversité biologique du complexe de l'OKM

La diversité biologique du complexe OKM est façonnée par l'effet du climat, du type de sol et des formations végétales de la région. L'analyse des cartes d'occupation du sol produites sur la réserve de biosphère du complexe de l'OKM fait sortir 4 unités : Forêt galerie et forêt claire post galerie à *Anogeissus leiocarpu*s ; Savane boisée à *Pterocarpus erinaceus* ; Savane boisée dégradée; Jachère relativement récente.

Dans les formations boisées, des inventaires de ressources ont été réalisé dans le but de connaitre la diversité biologique de la réserve avant son changement de statut. Les inventaires de la végétation ont permis de recenser 326 espèces réparties en 242 genres et 63 familles ; Les familles les plus représentées sont les Fabaceae (39 espèces), Poaceae (35 espèces), Rubiaceae (23 espèces), Combretaceae (16 espèces), Euphorbiaceae (15 espèces) et Mimosaceae (13 espèces). Trois genres sont les plus représentés : Combretum *(8 espèces), acacia (7 espèces) et Desmodium (7 espèces). Les ligneuses caractéristiques sont : Butyrospermum parkii, Strychnos spinoza, Gardenia erubescens, Acacia samoryana, Bauhinia thonningii, Bridelia scleronema, Parkia biglobosa, Terminalia macroptera, Tamarindus indica, Adansonia digitata, Daniellia oliverii* (rapport ENGREF, 2004).

Le complexe OKM est d'une grande richesse faunique. Les différentes sources d'informations auxquelles on a eu recours (MERF, 2002 et 2003 ; DFC, 2000, 2001 et 2002) indiquent que les espèces caractéristiques sont les grands mammifères onguligrades faisant partis des ordres des artiodactyles, des périssodactyles et des proboscidiens.

II.4. Problématiques traitées et Données utilisées

Pour rappel sur ce site d'étude, nous allons étudier la contribution des reliques forestières dans la stratégie REDD+ à travers l'analyse de leurs séquestrations de carbone. Afin de répondre à cette problématique, nous avons procédé à la cartographie de ces forêts. Pour réaliser cette cartographie pour l'année 2016 nous avons utilisé les images optiques Sentinel-2 et les images radar Sentinel-1. Ces données sont complétées par des données de référence.

II.4.1. données optiques

Les images Sentinel-2 sont utilisées pour aider localement à l'interprétation et au choix des zones d'intérêt pour les classifications. Les images Sentinel-2 (2 scenes sentinel-2) choisies sont celles qui ne disposent pas de couverture nuageuse dans la limite de la zone d'étude.

II.4.2. données radar

28 scènes Sentinel-1 sur une année (27-03-2015 au 23-12-2017) sont utilisées sur le site de l'OKM. L'Annexe 2 montre la liste des images Sentinel-1 et la figure 30 illustre l'emprise des images utilisées.

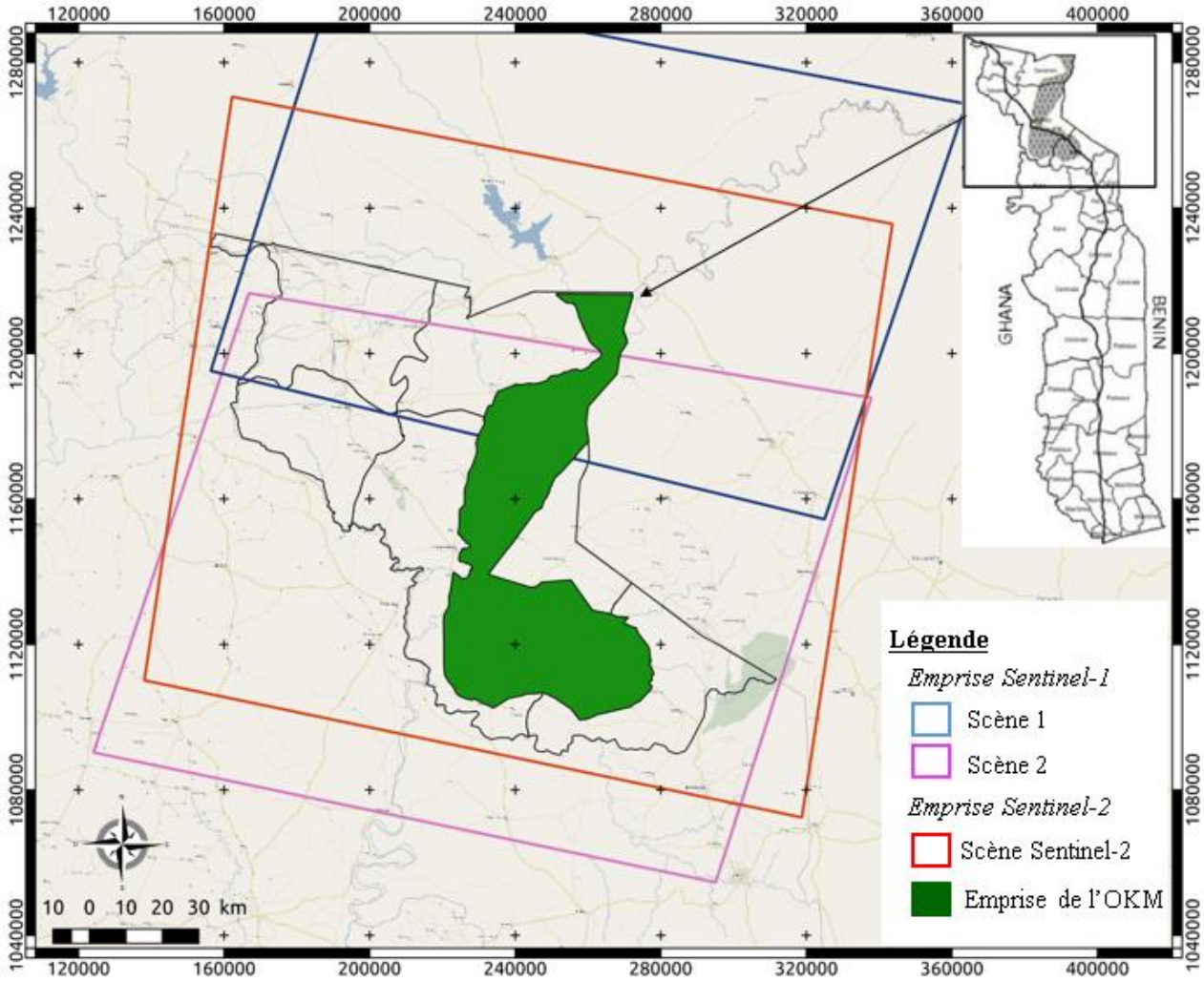


Figure 30:Emprise des images sentinel-1 et 2 sur le site d'OKM

II.4.3. Données de références

Les données de référence utilisées sur l'OKM sont :

- une carte topographique feuille N° NC-31-I-II de 1980 à l'échelle de 1/200000 ;
- une carte topographique feuille N° NC-31-XIII mise à jour en 2006 à l'échelle de 1/50000 ;
- une carte d'Inventaire Forestier Nationale de 2014 du MERF-TOGO ;
- une carte d'occupation du sol de 2017 du MERF-TOGO;
- un modele Numérique de terrain (MNT) SRTM à 30 m ;
- les points GPS de terrain et photographies collectées du 27-09-2017 au 15-10-2017.

III. Réserve de faune de Togodo (RFT) au Togo

La même problématique de la réserve de biosphère de l'OKM sera traitée au niveau de la réserve de faune de Togodo (RFT). Dans ce cas nous allons explorer la combinaison des données radar Sentinel-1 en bande C et les données radar ALOS-2 en bande L pour la cartographie des forêts galeries.

III.1. Localisation géographique

La Réserve de Faune de Togodo (RFT) est située au Sud-Est du Togo (Région Maritime et la Région des Plateaux) entre 1°20' et 1°40' de longitude Est et entre 6°40' et 6°50' de latitude Nord. Elle est à cheval sur la préfecture de Haho (Togodo-Nord à 35 Km de Notsè et à 180 Km de Lomé) et la préfecture de Yoto (Togodo-Sud à 24 km de Tabligbo et à 96 km de Lomé). Elle est limitée à l'Est par le fleuve Mono, au Sud par les villages de Tomety-Kondji, Sédomé, Adodomé, Gboto zévé et Zouvi, au Nord-Ouest par la forêt classée d'Asrama, au Nord-Est par la rivière Asrama et à l'Ouest par les rivières Akpaka et Afan et les fermes Kpové et Tsafé (Figure 31).

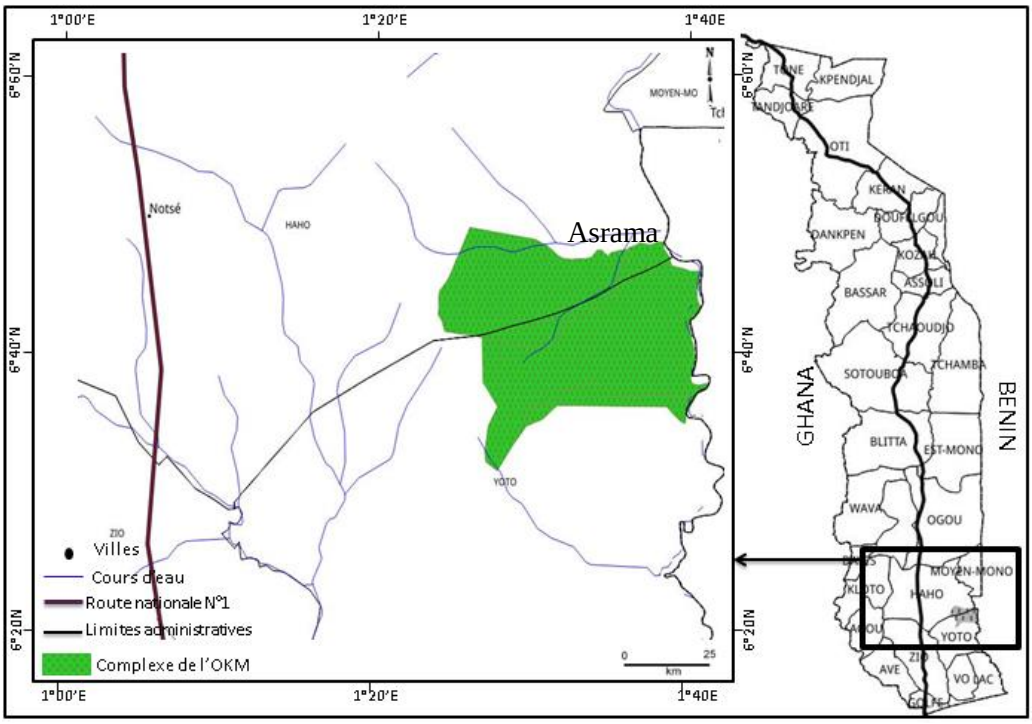


Figure 31: Localisation de la réserve de faune de Togodo

La réserve couvre actuellement une superficie totale de 25 500 ha et est composée de deux entités à savoir la forêt classée de Togodo Sud (15 000 ha, classée par arrêté n° 534/EF du 4 juillet 1954) et la forêt classée de Togodo Nord (10 500 ha, classée par l'arrêté n° 174/EF du 26 février 1954). D'après l'arrêté n° 003 MERF/CAB du 03 mai 2005, la forêt classée de Togodo Sud a été érigée en Parc National et se verra attribuer les fonctions de (i) protéger les

forêts reliques à des fins spirituelles, scientifiques, éducatives, récréatives et touristiques, (ii) perpétuer, dans les conditions naturelles, les éléments écologiques, géomorphologiques, sacrés et esthétiques et (iii) garantir une stabilité et une diversité économique locale. Quant à la partie nord de la réserve, elle est requalifiée en zone de gestion des ressources naturelles par l'arrêté n° 005 MERF/CAB du 02 février 2005 et a pour fonction d'assurer la productivité du cheptel sauvage et son habitat afin de promouvoir les activités cynégétiques et contribuer au développement régional et national.

III.2. Caractéristiques physiques

III.2.1. Climat

La RFT fait partie de la zone écologique V du Togo caractérisée par un climat de type équatorial de transition résultant du mouvement de deux types de masses d'air de hautes pressions. Il s'agit des masses d'air continentales (venant du nord-est et caractérisées par l'harmattan, vent sec et chaud) et des masses d'air maritimes (venant du sud-ouest et caractérisées par la mousson, un vent humide et chaud). La zone de rencontre de ces deux masses d'air détermine le Front Inter Tropical (FIT), dont la fluctuation au cours de l'année est à l'origine des saisons. Ce type de climat équatorial se caractérise par une alternance de deux saisons des pluies et de deux saisons sèches bien marquées :

- une grande saison des pluies de mars à juillet ;
- une petite saison sèche de juillet à septembre ;
- une petite saison des pluies de septembre à octobre ;
- une grande saison sèche de novembre à février.

La pluviométrie annuelle varie entre 1000 et 1300 mm (Sessi 1998). Ces précipitations sont plus fortes pendant les saisons des pluies. Les données des paramètres climatiques sur une période de 40 ans (entre 1971 et 2010) recueillies au niveau de la station météorologique de Tabligbo dans la préfecture de Yoto montrent que la pluviométrie moyenne annuelle est de 1016 mm. Le maximum de précipitations est atteint au mois de juin avec des précipitations de plus de 161 mm. La température moyenne annuelle est atteinte au mois de mars (30,45°C).

La courbe ombrothermique présentée ci-dessous indique que la région jouit d'une double saison des pluies, caractéristique de la région côtière. Cette particularité est importante à signaler car elle permet aux agriculteurs de réaliser deux cultures par an sur la même parcelle.

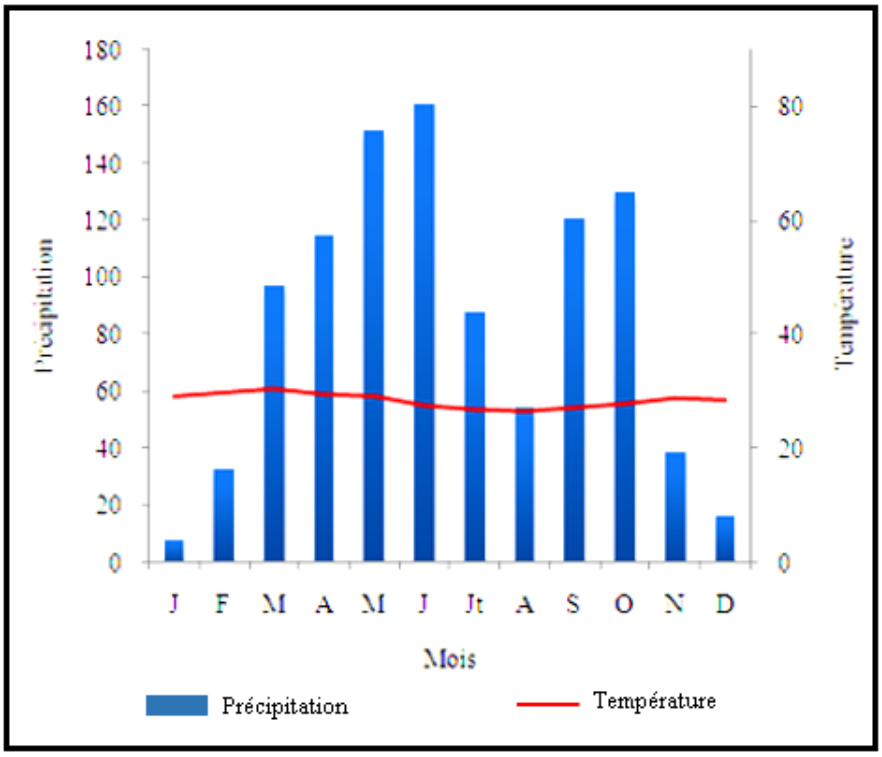


Figure 32: Courbe Ombrothermique au sens de Gaussen de la station de Tabligbo (Source : station météorologique de Tabligbo préfecture de Yoto (juillet 2011), les données sont collectées sur cette station sur une durée de 30 ans)

III.2.2. Relief

La RFT s'étend sur la pénéplaine précambrienne et présente un relief faiblement ondulé où l'altitude varie de 50 à 100 m. La zone s'incline graduellement vers l'Est, en direction du fleuve Mono (FAO, 1997). Elle présente un modelé de croupe avec des petits accidents topographiques isolés qui apparaissent sous forme d'inselbergs : le mont Gbéto, situé en partie dans la réserve, constitue ainsi une colline de 60 à 70 m de hauteur, résultat de l'érosion différentielle du gneiss granitique avec d'épaisses veines quartzeuses par rapport au substrat environnant (Adjonou, 2011). Des affleurements de migmatites apparaissent aussi, notamment au nord-est de la réserve. Sur le reste de ce socle cristallin d'âge birrimien, se trouvent des gneiss et des micaschistes dont la décomposition donne des sols argileux avec un horizon de surface sableux.

Toute la zone étant une pénéplaine il existe très peu ou presque pas de zone à pente forte, facilitant l'utilisation des données radar.

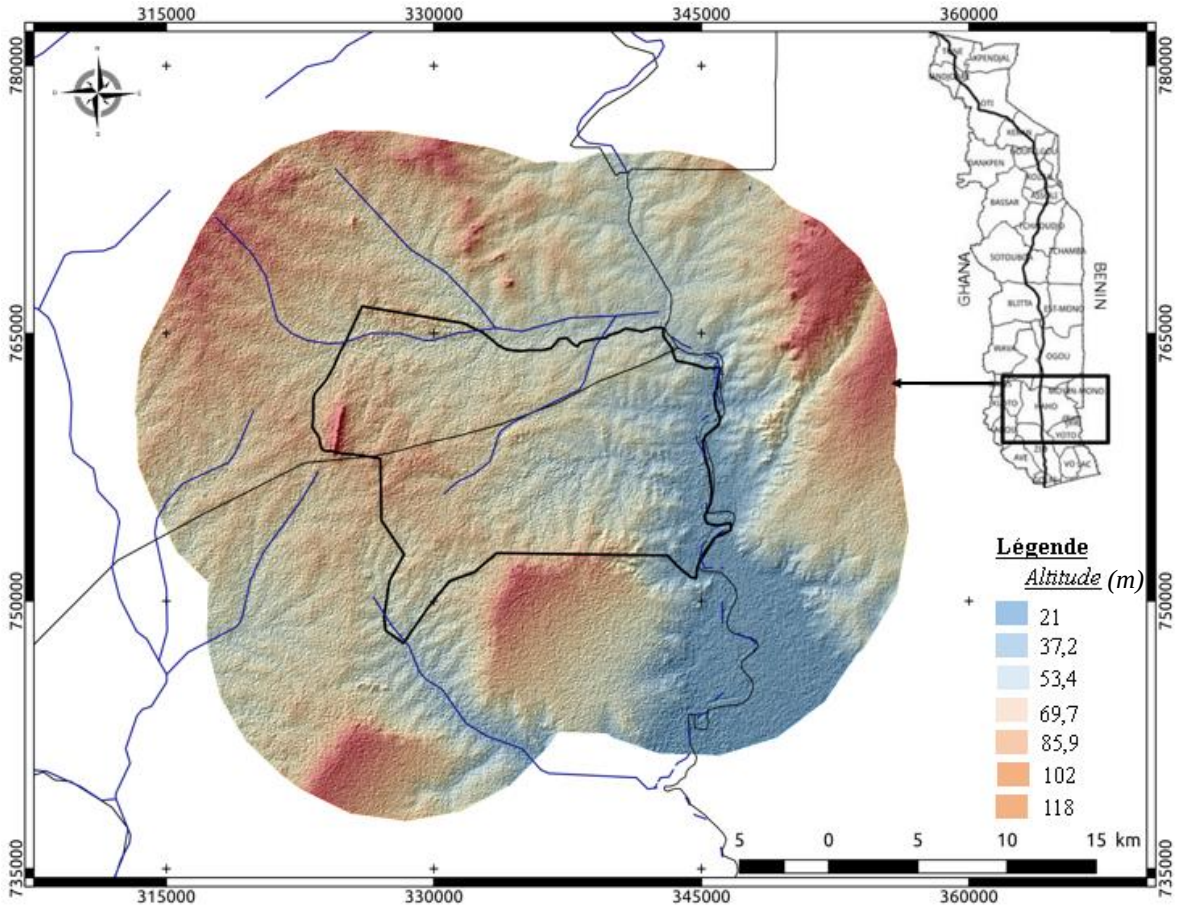


Figure 33:Représentation du relief de l'RFT (élaborée par Kemavo)

III.2.3. Sol

Les sols qui se développent sur les formations géologiques dans la région de la RFT sont assez divers. Ils appartiennent à trois classes de sols selon la classification pédologique de l'IRD :

- ***les sols peu évolués:*** deux séries sont distinguées:
    - *des sols d'érosion ;*
    - *des sols d'apports, modaux sur alluvions fluviales.*
- ***les vertisols (argiles noires tropicales):***
- ***Les sols à sesquioxydes:*** Il y a deux groupes représentés dans la réserve :
    - *les sols ferrugineux tropicaux, à pseudogley de profondeur ;*
    - *les sols faiblement ferralitiques modaux.*

III.2.4. Réseau hydrographique

Les limites naturelles de la RFT sont matérialisées par des cours d'eau. La RFT est drainée par le fleuve Mono et ses affluents (l'Anié, l'Ogou, l'Amou, le Kra) (MERF, 2002 et 2003). La partie Sud est arrosée par les rivières Houdoulé, Afan, N'djatoé, Kpédaba, Adjrala, Adonkpé et Dogbotohui. On retrouve également une mare appelée Havou. Le fleuve Mono d'une longueur de 450 km, plus long que le pays dans sa dimension Nord-Sud (Addra, 1981), coule pendant toute l'année et connaît de grandes crues en saison pluvieuse. Il prend sa source en zone de

montagne dans les monts Alédjo et draine un bassin versant de 2120000 ha (MERF, 2003). A son entrée dans le bassin sédimentaire côtier, le fleuve Mono alimente de nombreux marécages et des mares, entre autres les mares d'Afito (108 ha), de Lagoé (34 ha), de Lotoé (19 ha) et de Dindin (15 ha) (Atutonu, 2005). Dans la partie Nord de la Réserve, le réseau hydrographique est constitué essentiellement de la rivière Asrama et ses affluents.

III.3. Diversité biologique de la RFT

La flore de la RFT est caractéristique de la zone 5 suivant la classification écologique du pays. Cette zone correspond au littoral et présente des formations végétales très dégradées. Il s'agit d'une mosaïque d'îlots forestiers disparates, de reliques de forêts galeries, de savanes très anthropisées, de fourrés littoraux, de prairies halophiles ou marécageuses, de mangroves, de jachères et de cultures (MERF, 2011).

La RFT est assez représentatives de cette zone écologique. Le couvert végétal de cette réserve est ainsi composé de Forêts dense et galeries forestières, forêts claires, de savanes boisées et arbustives et de savanes herbeuses, de zones de culture et de jachère. Les essences forestières dominantes sont *Anogeissus leiocarpa* (DC) Guill. & Perr, (Combretaceae), *Triplochiton scleroxylon* K.Schum, (Malvaceae), *Cola cordifolia* (Cav.) R.Br (Sterculiaceae), *Uapaca togoensis* Pax (Euphorbiaceae), *Afzelia africana* Sm. ex Pers (Caesalpiniaceae). La végétation hydrophile est floristiquement très riche avec un cortège de 210 espèces (UICN, 2008 (b)).

On distingue entre autre :

- Des mammifères comme l'hippopotame (*Hippopotamus amphibius*), le buffle d'Afrique (*Syncerus caffer*), l'Aulacode (*Thryonomis swinderianus*), le porc épic (*Hystrix cristata*), le galago du sénégal (*Galago senegalensis*) ;
- Des reptiles tels que le crocodile de Nil (*Crocodilus niloticus*), le varan du Nil (*Varanus niloticus*), le python royal (*Python regius*);
- Des oiseaux tels que le dendrocygne veuf (*Dendrocygna viduata*), l'anhinga roux (*Anhinga rufa*), le martin chasseur (*Halcycon senegalensis*), le heron cendré (*Ardea cenera*), le pelican gris (*Pelecanus rufescens*);
- Des poissons dont *Gymnarchus niliticus, Hemichromis niloticus, Synodontis sp, Helerotis niloticus, Clarias lasera, Periophtalmus papilio*;
- Des amphibiens tels que *Bufo regularis, Phrynobatrachus accraensis, Dicroglossus occipitalis, Rana oxyrrhynchus* ;
- Des insectes tels que *Laceophilus* spp, *Copelatus* sp, *Hyphydrus careyus*.

Elle abrite le Singe à ventre rouge (*Cercopithecus erythrogaster*), espèce vulnérable et menacée, endémique au Sud du Togo et au Bénin (Houngbedji, 2010).

III.4. Problématiques traitées et Données utilisées

Sur ce site d'étude, nous avons exploré l'apport de la combinaison des images ALOS-2 (Mosaïque de 2016) et une série temporelle d'images Sentinel-1 acquises aussi en 2016. Ces données sont complétées par des données de références.

III.4.1. données radar

Sentinel-1

Les scènes d'image Sentinel-1 ont été acquises entre le 27 mars 2015 et le 23 décembre 2017 en format GRD avec les polarisations VV, VH. Au total 71 scenes ont été sélectionnées (voire annexe 3), figure 34.

ALOS-2

Deux scenes Alos-2 ont été utilisées (voire annexe 3). La figure 34 illustre l'emprise des images utilisées.

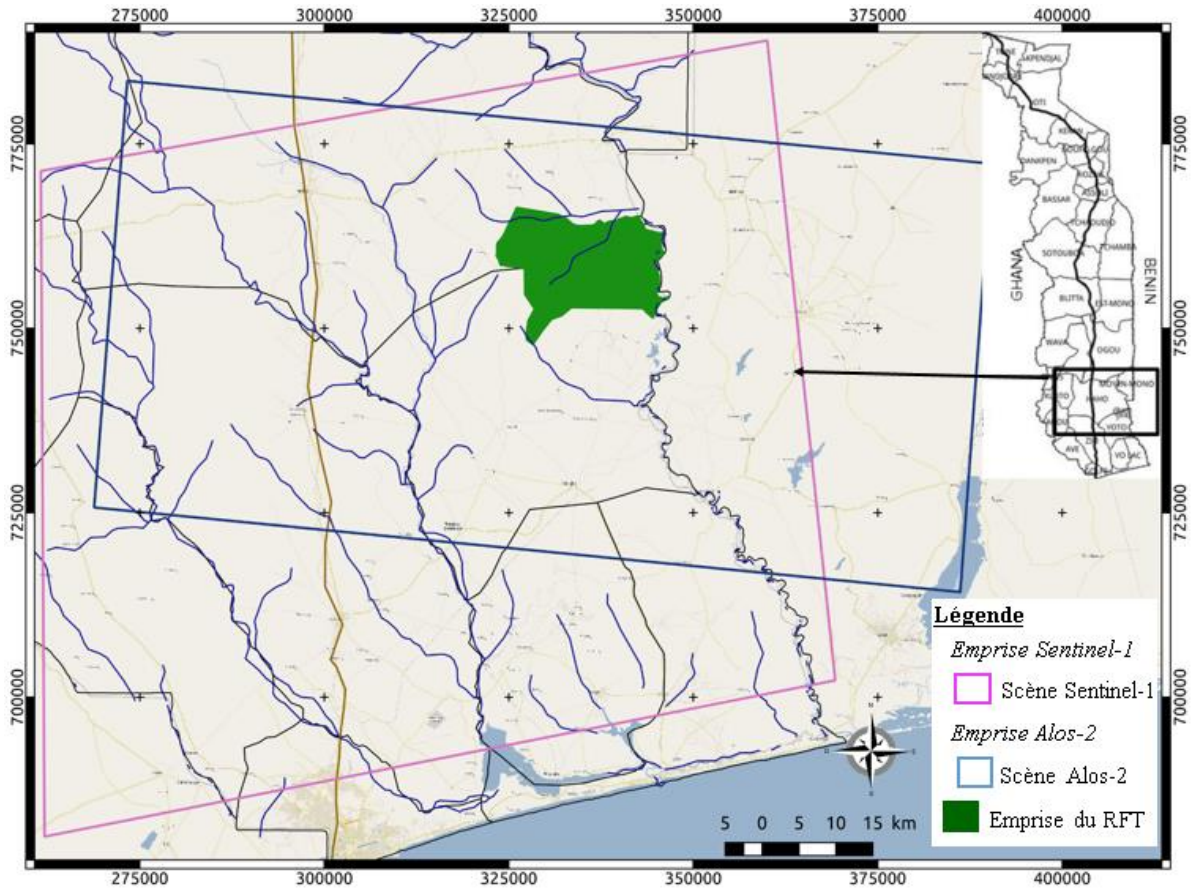


Figure 34: Emprise d'extrait des images sentinel-1 et Alos-2 sur le site de RFT au Sud-Togo (Emprise differente pour les deux images)

III.4.3. Données de références

Les données de références utilisées sur le site de RFT sont :

- une carte topographique feuille N° NC-31-I-II de 1980 à l'échelle de 1/200000 ;
- une carte topographique feuille N° NC-31-XIII mise à jour en 2006 à l'échelle de 1/50000 ;
- une carte d'Inventaire Forestier Nationale de 2014 du MERF-TOGO ;
- une carte d'occupation du sol de 2017 du MERF-TOGO ;
- un modèle Numérique de terrain (MNT) SRTM à 30 m ;
- les points GPS de terrain et photographies collectées du 27-09-2017 au 15-10-2017.

IV. Littoral de la plaine de Kourou en Guyane française

Le littorale de la plaine de kourou fait partie integrante du territoire de la Guyane française.

IV.1. Localisation géographique

Le littoral de la plaine de Kourou est situé à la façade atlantique de la Guyane française (figure 35). Le territoire de la Guyane française est localisé entre 2.5° et 5.5° latitude nord et 51.5° et 54.5° de longitude ouest. Plus de 90% de la surface de la Guyane française sont occupés par la forêt tropicale humide.

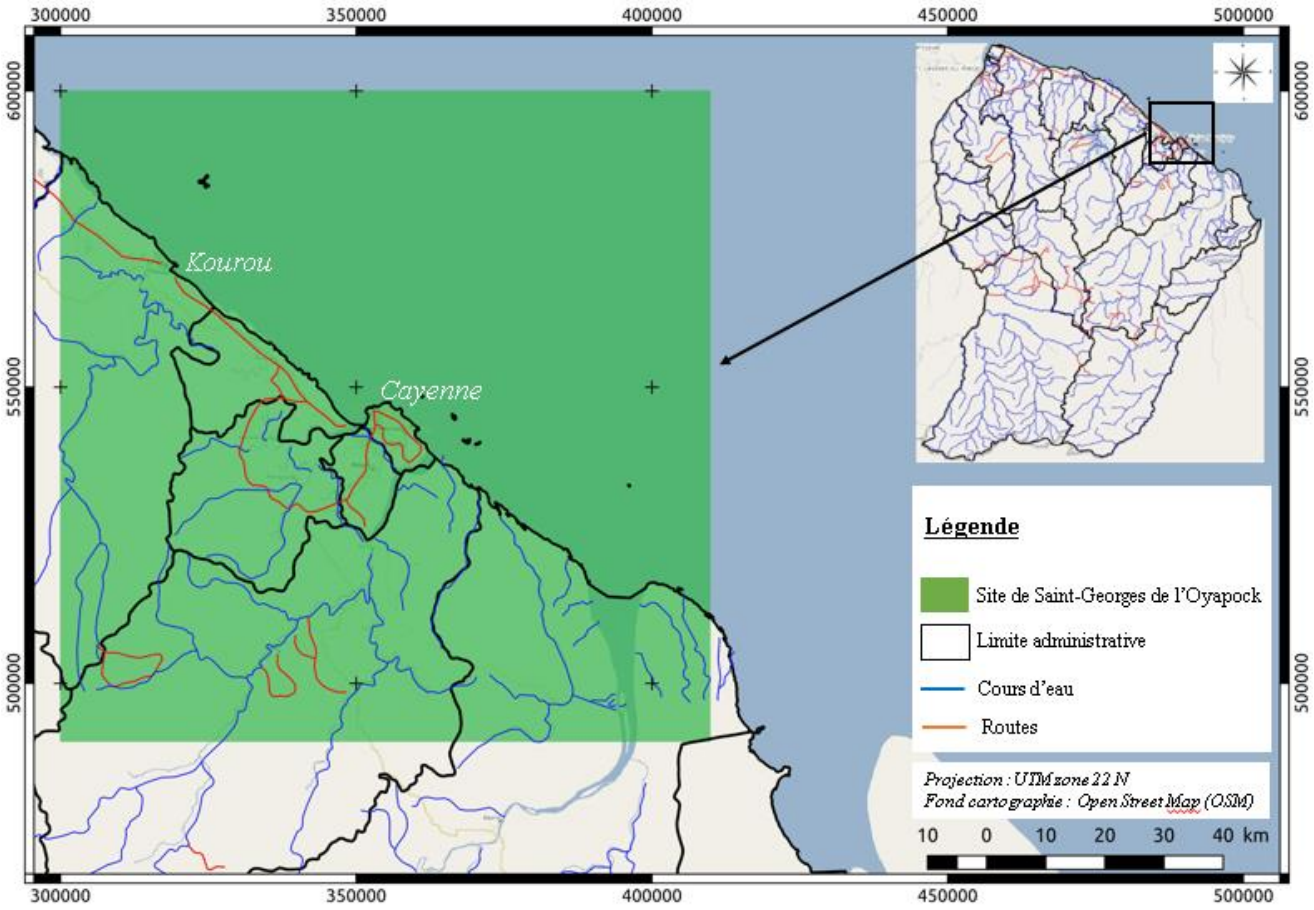


Figure 35: Localisation du site test de Kourou

IV.2. Caractéristiques physiques

IV.2.1. Climat

La Guyane française est caractérisée globalement par un climat de type équatorial humide. Ce climat correspond à deux grandes saisons : une grande saison sèche qui dure d'août à décembre et une grande saison des pluies qui dure d'avril à août. Deux petites saisons : une petite saison sèche qui dure de février à mars et une petite saison des pluies qui dure de décembre à janvier. La figure 36 présente le courbe ombrothermique du site de Kourou. Sur le site de Kourou, la précipitation annuelle est de 2830 mm, la précipitation minimale est atteinte au mois de septembre avec 43 mm de pluie et le maximum est atteint au mois de mai avec 453 mm de pluie.

Sur le site de Kourou, la température moyenne est de 26,1°C, la température minimale est de 21,6 °C et est atteinte au mois de juillet. La température maximale est de 31,7°C, elle est atteinte au mois d'octobre.

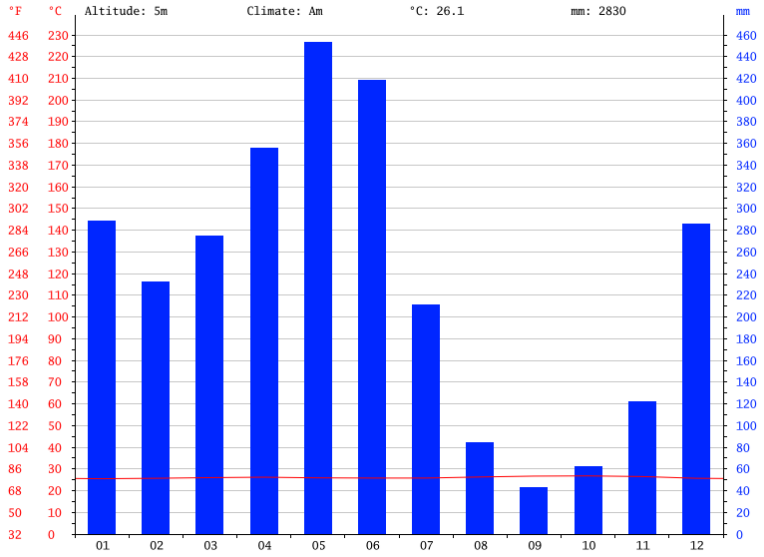


Figure 36: Courbe Ombrothermique sur le site de Kourou (https://fr.climate-data.org/location/410985/, les données sont collectées sur la station de kourou sur une durée de 30 ans)

IV.2.2 Relief

Le relief de la Guyane est caractérisé par un assemblage de zones côtières, de vastes plaines et de plateaux. En dehors de quelques plateaux dont l'altitude peut atteindre 150 m, l'essentiel de la région est constitué de plaines dont l'altitude est comprise entre 5 et 50 m. Le sommet le plus élevé en Guyane est le mont Tigre de 200 m d'altitude. Il n'existe pas de massif montagneux important sur le territoire, les pentes sont très faibles (figure 37).

IV.2.3. Sol

La Guyane est caractérisée par un important phénomène de sédimentation et d'érosion côtière qui est en partie à l'origine de la formation des sols. Selon la classification française (CPC, 1967), on distingue les classes de sols suivant :

- la classe des sols minéraux bruts ;
- la classe des sols peu évolués ;
- la classe des sols podzoliques et des podzols ;
- la classe des sols ferralitiques (la plus représentée) ;
- la classe des sols hydromorphes.

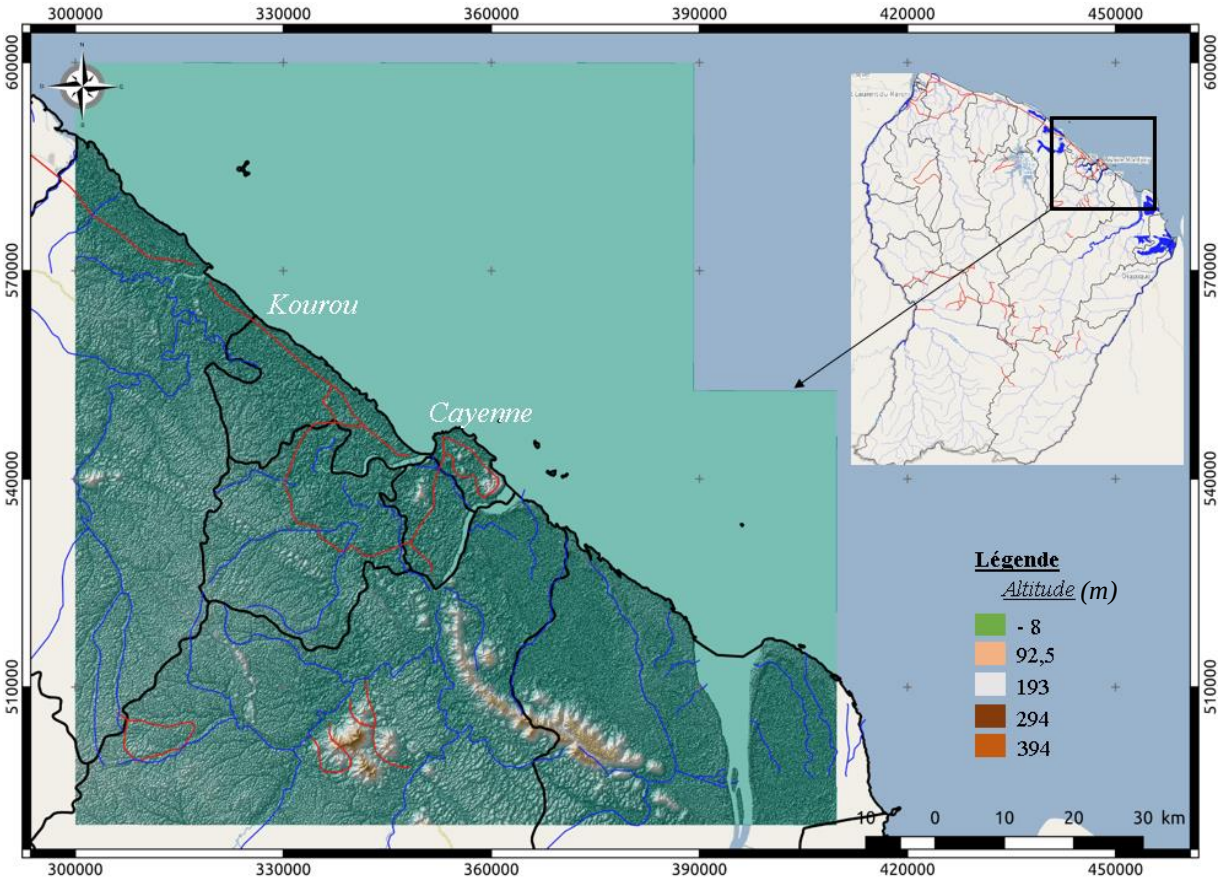


Figure 37: Représentation du relief du site de Kourou (élaborée par Kemavo)

IV.2.4. Réseau hydrographique

De nombreuses rivières ainsi que des criques se jettent dans la mer en formant de longs estuaires, d'Est en Ouest. Ces rivières et fleuves sont les suivantes:

- Oyapock,
- Approuague,
- Mahury,
- Larivot,
- Kourou,

- Sinnamary,
- Couamama,
- Iracoubo,
- Kaw,
- Maroni.

IV.3. Diversité biologique de la Guyane Française

La biodiversité de la Guyane Française est très importante tant au niveau floristique que faunistique. La forêt de la Guyane Française abrite des écosystèmes uniques qui sont parmi les plus riches et les plus fragiles du monde ; forêts tropicales primaires très anciennes, mangroves, savanes, inselbergs et nombreux types de zones humides.

Le recencement du partrimoine écologique de la Guyane Française montre qu'il est composé de :

- 5 500 espèces végétales, dont plus d'un millier d'arbres,
- 684 espèces d'oiseaux, incluant une importante faune rapace (80 % des rapaces connus et encore présents dans les territoires d'outre-mer au début des années 2002).
- 177 espèces de mammifères,
- Plus de 500 espèces de poissons,
- 109 espèces d'amphibiens.

IV.4. Problématiques traitées et données utilisées

Sur le site de la plaine du littoral de Kourou nous allons étudier le potentiel des images Sentinel-1 pour la discrimination des types de formations végétales et la cartographie de l'occupation des sols. En plus de ces données d'imagerie optiques et radar nous avons utilisé un ensemble de données de référence nécessaires à la compréhension des sites d'étude.

IV.4.1. Données optiques

Deux scènes d'images pléiade acquises en décembre 2012 sur la zone de Kourou sont utilisées (voire annexe 4), figure 38.

IV.4.2. Données radar

Sur le site de la plaine littorale de Kourou : au total 31 scènes d'images Sentinel-1 ont été utilisées (voire annexe 4), figure 38.

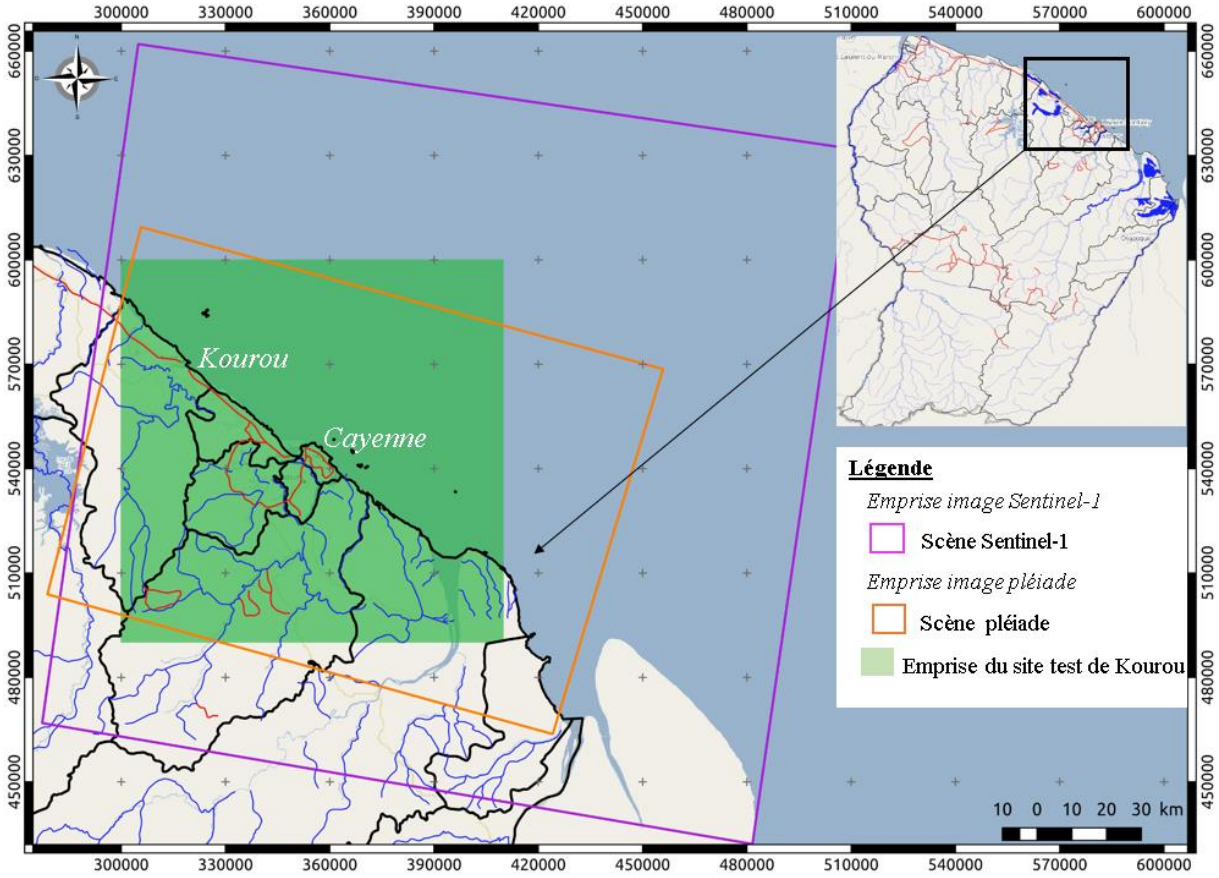


Figure 38: Emprise des images Sentinel-1 et Pléiade sur le site de la plaine du littorale de Kourou

IV.4.3. Données de référence

Pour les sites d'étude de la Guyane Française nous disposons de :

- la base de données Topo de l'Institut Géographique National (IGN) à l'échelle de 1/50000 ;
- la base de données Carto de l'IGN ;
- la carte d'occupation du sol issue de l'ONF de 2001, 2005 et 2008 sur la zone du littoral à une échelle de 1/25000 ;
- la carte de végétation du Laboratoire d'Ecologie Tropicale (LET) de 1995 sur la zone du littoral à une échelle de 1/25000 ;
- la carte d'orpaillage et de déforestation réalisée par ONF et ONF International en 2015 et 2017.

Sur l'ensemble des sites nous avons également des photographies de terrain et des modèles numériques de terrain (MNT) avec un pas de 30 m. Nous avons également utilisé sur tous les sites d'étude des données de la plateforme Google Earth pour des contrôles localisés.

V. La a zone frontière de Saint-Georges de l'Oyapock de française

V.1. Localisation géographique

Cette zone d'étude est située à la frontière entre la Guyane française et le Brésil. Le site d'études est localisé autour de la ville de Saint-Georges de l'Oyapock. La ville est reliée à l'état d'Amapa au Brésil par des flux de pirogues et un pont permettant et facilitant la circulation entre les deux territoires (Figure 39).

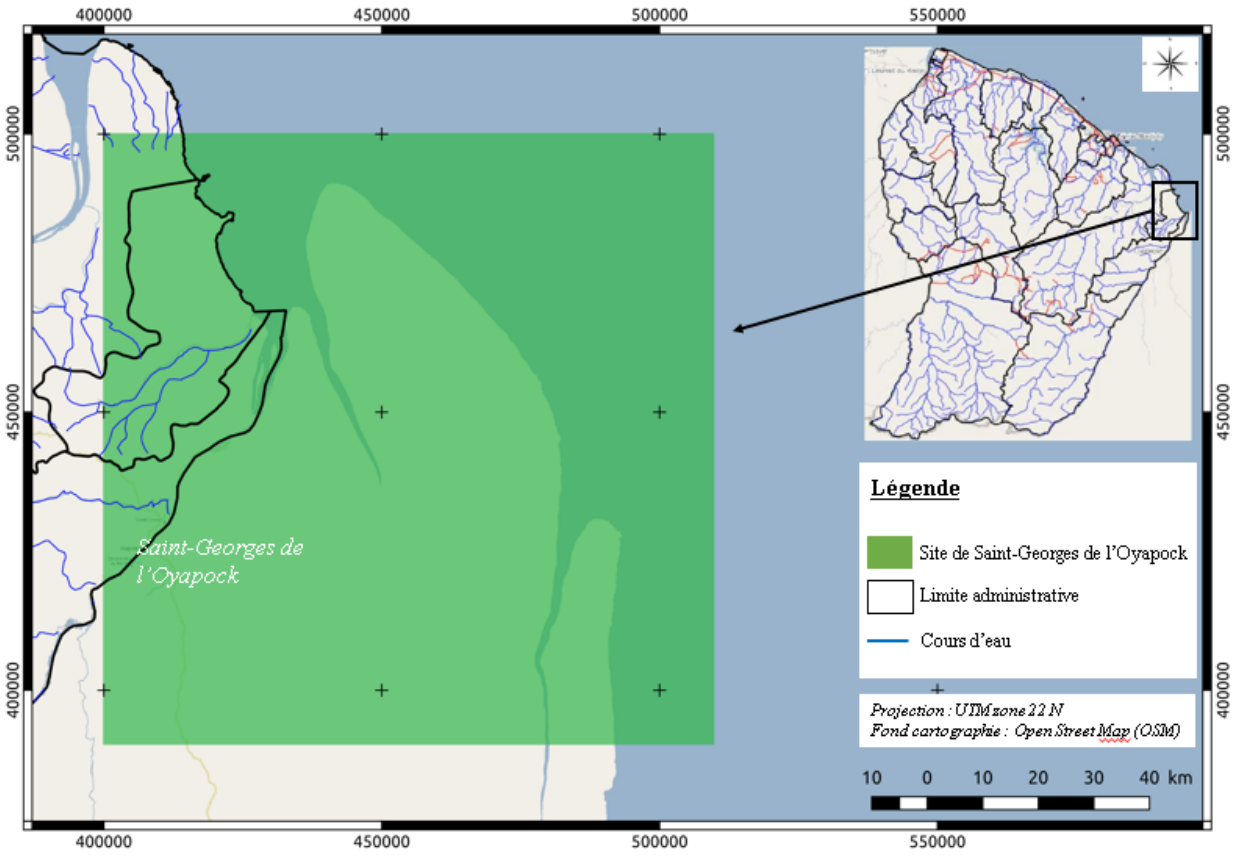


Figure 39: Localisation du site test de Saint-Georges de l'Oyapock

V.2. Caractéristiques physiques

V.2.1. Climat

Sur le site de Saint Georges de l'Oyapock la précipitation annuelle est de 3405 mm, les précipitations sont minimales est au mois d'octobre avec 44 mm de pluie et maximale au mois de mai avec 537 mm de pluie.

Sur le site de Saint Georges de l'Oyapock, la température moyenne est de 25,9°C, la température minimale est de 20°C, elle est atteinte au mois d'octobre et la température maximale est de 33°C et est atteinte le même mois.

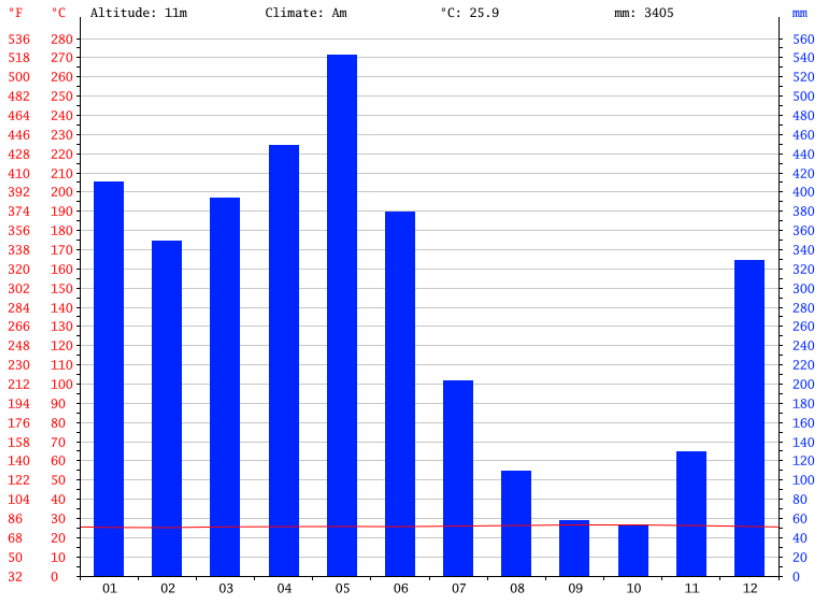


Figure 40:Courbe Ombrothermique du site de Saint Georges de l'Oyapock (https://fr.climate-data.org/location/410985/, les données sont collectées sur cette station sur une durée de 30 ans)

V.2.2 Relief

La figure 41 montre la topographie de la zone de Saint-Georges de l'Oyapock.

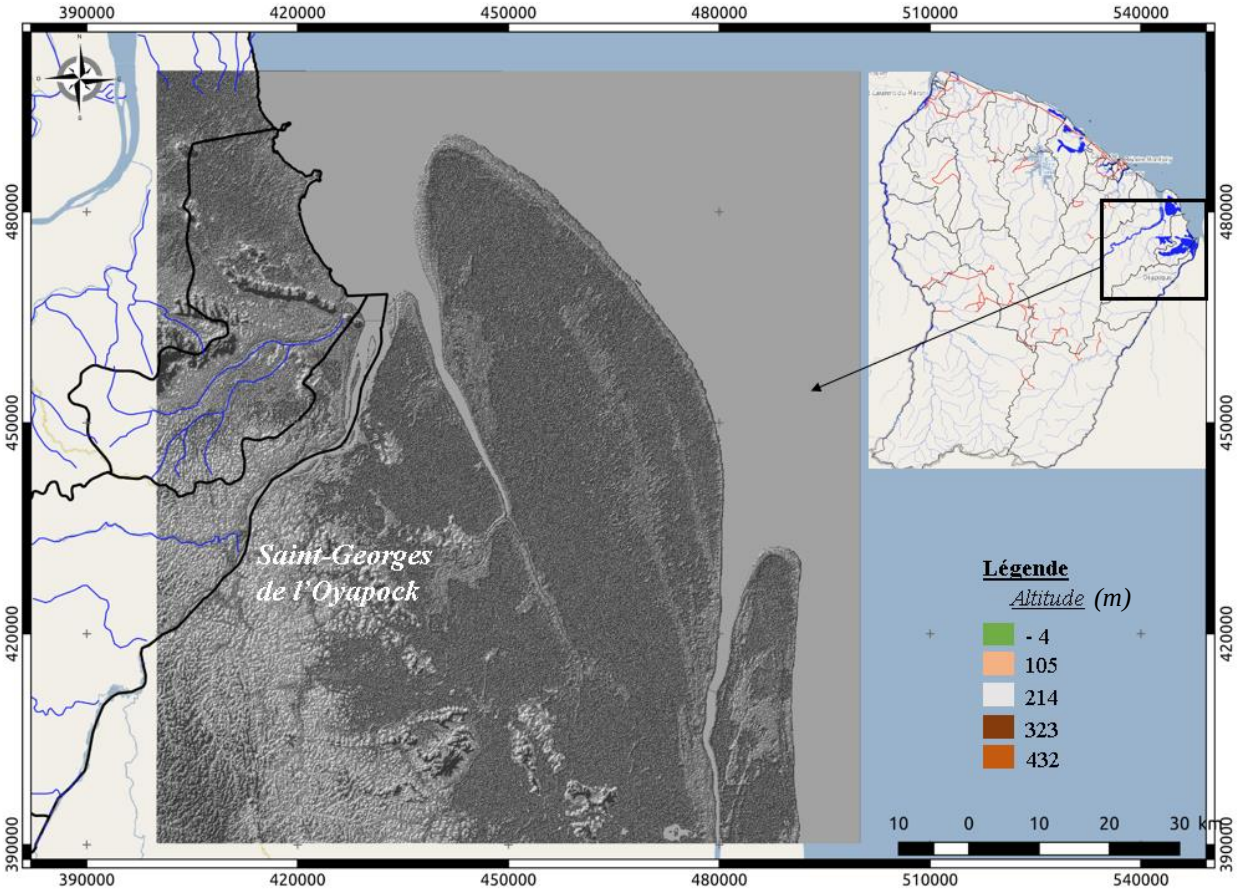


Figure 41: Représentation du relief de la zone de Saint-Georges de l'Oyapock (élaborée par Kemavo).

V.2.3. Sol

Les sols de la zone d'étude sont décrits dans la partie IV.2.3 de ce chapitre.

V.2.4. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est décrit dans la partie IV.2.4 de ce chapitre.

V.3. Diversité biologique du site de Saint-Georges de l'Oyapock

La diversité biologique de Saint-Georges de l'Oyapock est decrite dans la partie IV.3.

V.4. Problématiques traitées et données utilisées

Sur ce site l'objectif est de détecter et caractériser les changements dans les zones de forêts denses autour du pont qui relie la Guyane française et l'état de l'Amapa du Brésil. Nous avons pour cela utilisé des images Sentinel-1 qui couvrent la période du 12-05-2015 au 09-12-2017.

IV.4.1. Données optiques

Les images optiques (Landsat, peiade ou encore Sentinel-2) ne sont pas utilisées sur ce site.

IV.4.2. Données radar

Sur le site de Saint-Georges de l'Oyapock, au total 89 scènes d'images Sentinel-1 ont été utilisées (cf. tableau 16, annexe 5), figure 42.

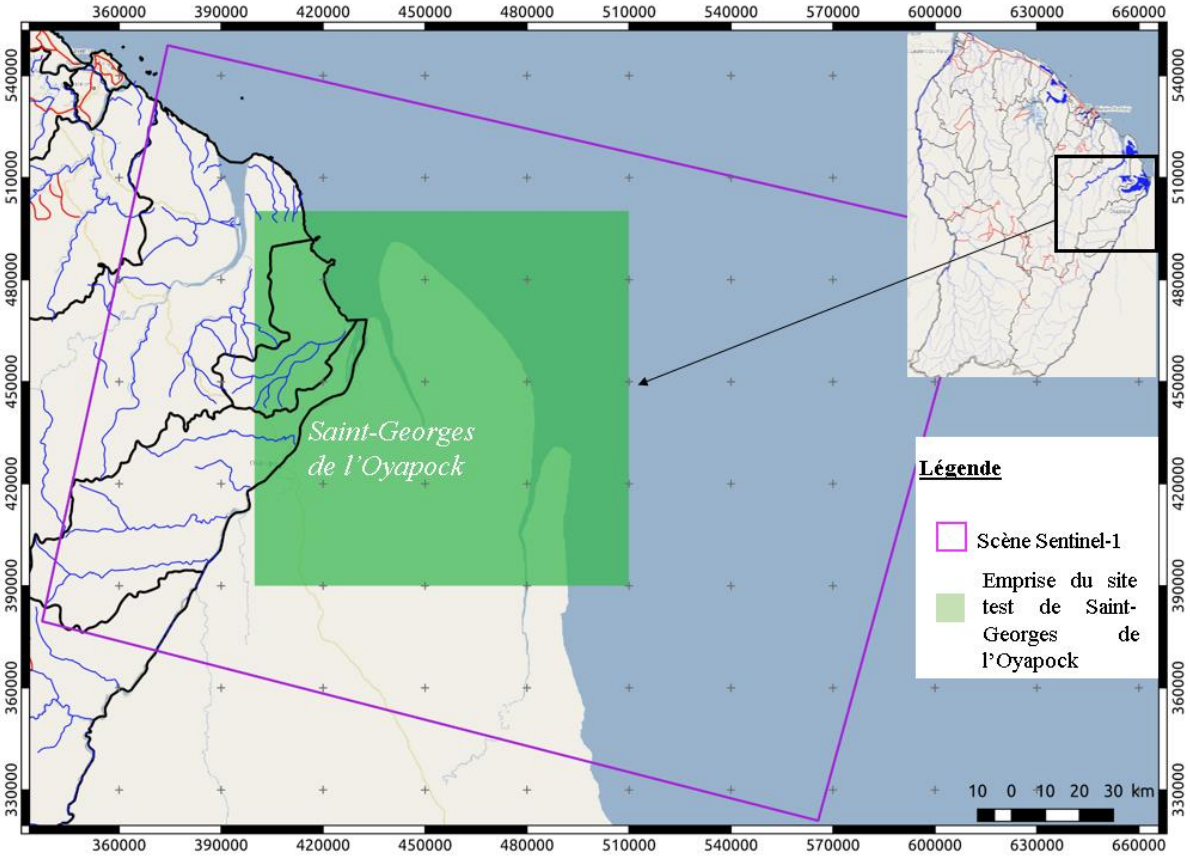


Figure 42: Emprise des images Sentinel-1 sur le site de Saint-Georges de l'Oyapock

V.4.3. Données de référence

Les données de référence utilisées sur le site de la plaine littoral de Kourou sont les mêmes que celles utilisés sur le site de Saint-Georges de l'Oyapock.

VI- Les forêts tropicales sèches de la Caraïbe : Cas de la province de *Monté Cristi* en République Dominicaine

VI.1. Localisation géographique

La province de Monté Cristi est située au nord-ouest de la République Dominicaine. Elle est l'une des 32 provinces de la République. D'une surface de 188600 ha, elle est limitée à l'ouest par la province de *Puerto Plata* et *Val verde*, au sud par la province de *Santiago-Rodriguez* et *Dajabon* à l'ouest par *République d'Haïti* et au nord par l'Océan Atlantique. Son chef-lieu est la ville *de San Fernando de Monte Cristi*. Le secteur économique est basé sur les activités suivantes:

- *activité agricoles :* C'est l'activité principale de la province. Cette agriculture est dominée par la culture du riz et de la banane. Elle façonne le paysage de la province ;
- *activités commerciales* : le commerce représente un autre secteur d'activité économique. Il est de moindre importance que l'agriculture. Le commerce se fait dans un premier temps avec les autres provinces du pays, dans un second temps il est tourné vers l'extérieur, notamment vers les républiques d'Haïti, de Cuba, et des Etats-Unis d'Amérique (USA). Le pays, au départ de la province de Monté Cristi exporte essentiellement des produits agricoles et en particulier les bananes. Il faut noter également la présence du port de Monté Cristi facilitant ces échanges commerciaux ;
- *Activités touristiques :* La province dispose d'un potentiel touristique important caractérisé par des plages de sable fin et des îles (les îles des 7 frères). Localement ce potentiel n'est pas complètement mis en valeur.

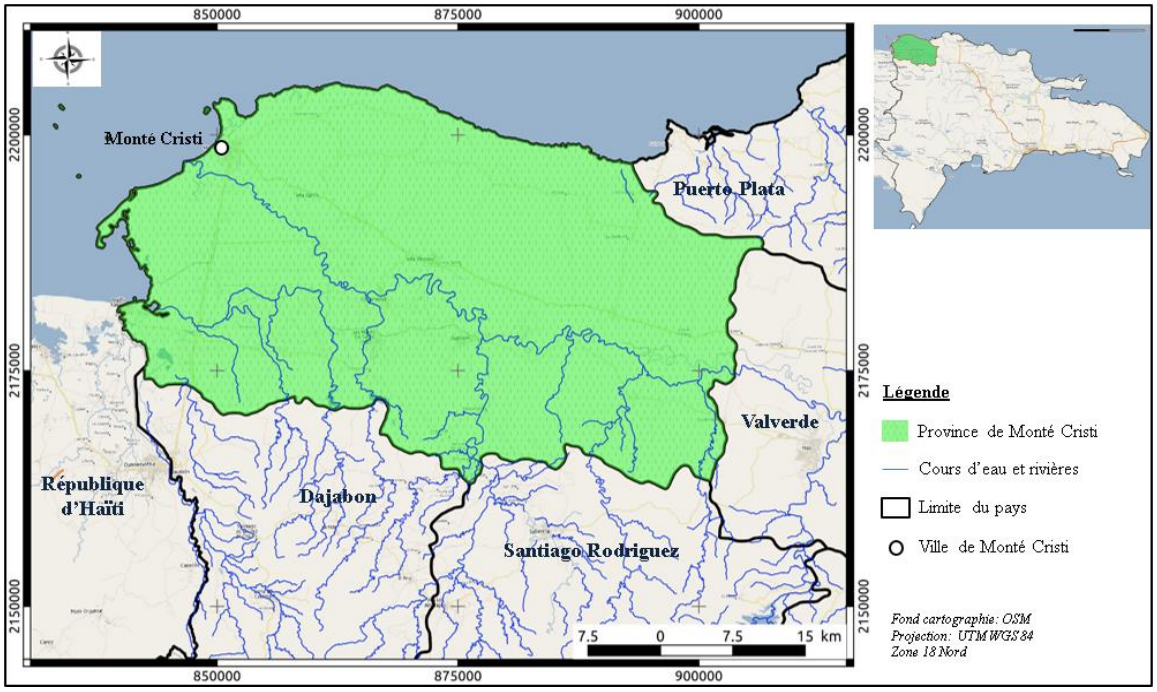


Figure 43: Localisation de la province de Monté Cristi

VI.2. Caractéristiques physiques

VI.2.1 Climat

La République dominicaine se caractérise par un climat de type tropical sec. Les températures s'étalent entre 20 et 30°C tout au long de l'année avec les plus basses en janvier et février et les plus élevées en août. Les précipitations varient entre 600 mm au nord-ouest du pays à 2400 mm nord-est du pays.

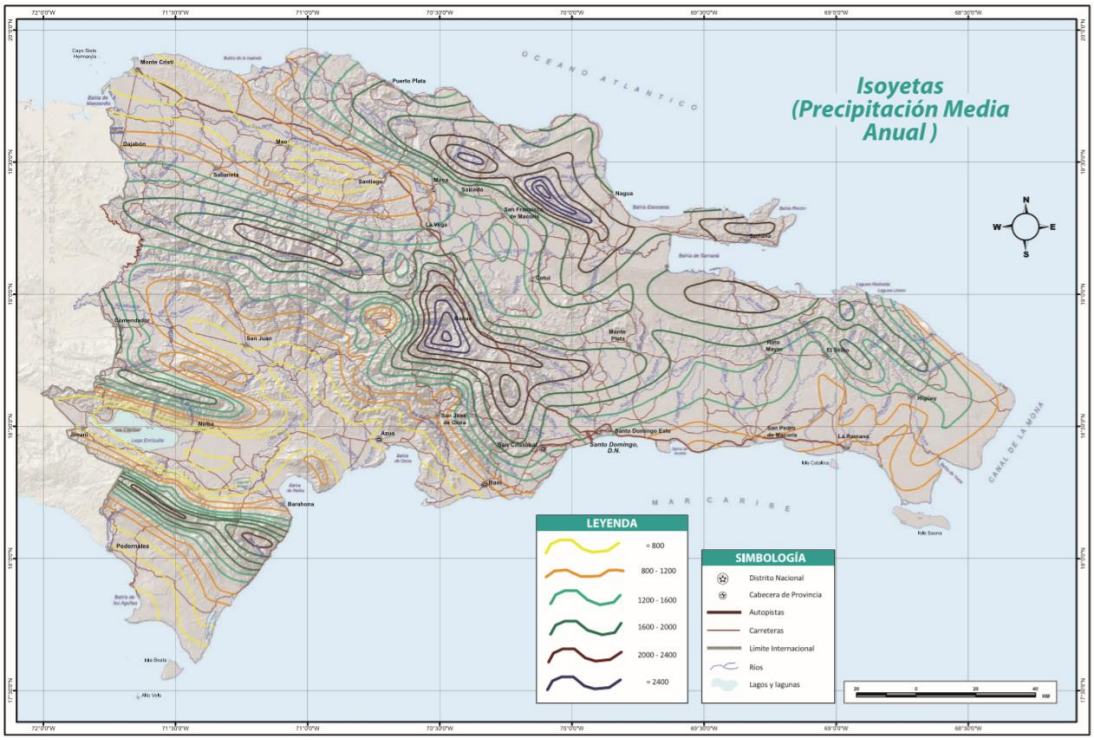


Figure 44: Carte des isohyètes de la république dominicaine (source : atlas - ministere de l'environnement et des ressources naturelles – republique dominicaine, 2012).

Comme le reste du pays, la province de *Monte Cristi* bénéficie d'un climat tropical sec d'après la classification des climats de Köppen et Geiger (https://fr.climate-data.org/location/2997/). Elle est caractérisée par deux saisons des pluies (une grande saison des pluies d'Octobre à janvier et une petite saison des pluies d'avril à juin) et deux saisons sèches (une grande saison sèche de juillet à septembre et une petite saison sèche de février à mars). La moyenne annuelle des précipitations est de 693 mm. La température moyenne annuelle est de 26,3 °C.

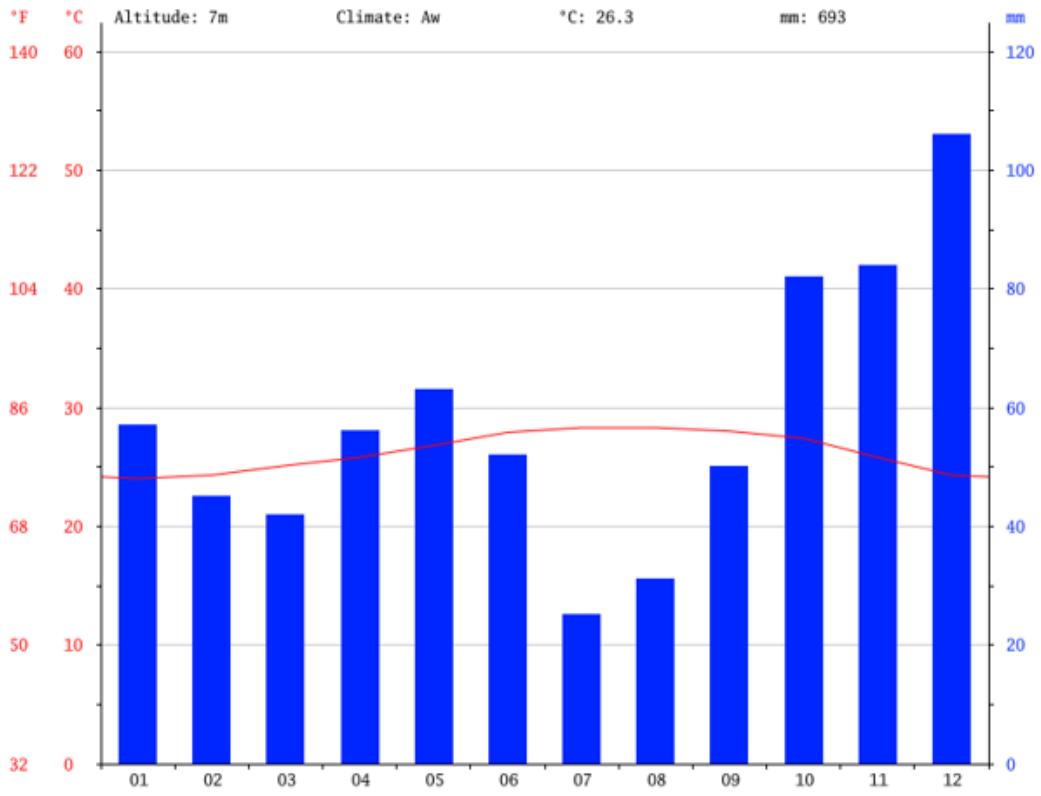


Figure 45: Courbe Ombrothermique du site de la province de Monté-Cristi en République Dominicaine, https://fr.climate-data.org/location/2997/, les données sont collectées sur une durée de 30 ans.

VI.2.2. Relief

Le relief du territoire dominicain se caractérise par une variation de dépressions et d'élévations. L'altitude varie entre 40 m en dessous du niveau de la mer dans la zone Hoya de Enriquillo à 3187 m au-dessus du niveau de la mer dans la zone de la Cordillera Central *(figure 45 ; source : atlas - ministère de l'environnement et des ressources naturelles – republique dominicaine, 2012).*

La province de Monté Cristi se trouve dans la partie du pays composée de vallées et de vastes plaines d'altitudes variant entre 50 m et 250 m au-dessus du niveau de la mer. Cette zone résulte d'une submersion formée dans les périodes Miocéne-Oigocéne et qui a donné naissance au lac Enriquillo, le principal et plus grand de la région (figure 46).

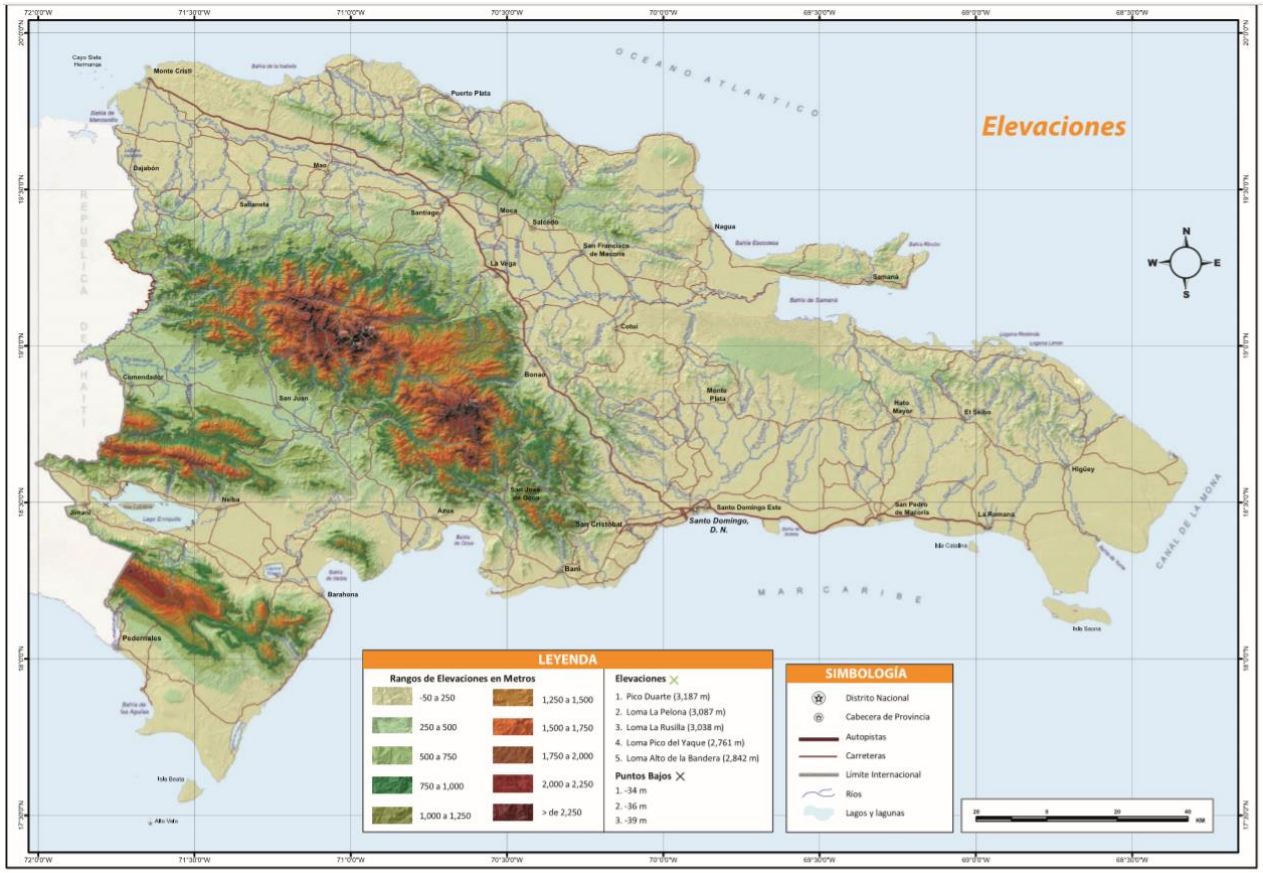


Figure 46: Carte des altitudes de la République Dominicaine (source : atlas - ministère de l'environnement et des ressources naturelles – Republique Dominicaine, 2012).

VI.2.3. Sol

Les sols de la République Dominicaine sont constitués principalement de sédiments marins, avec des affleurements clairsemés de roches métamorphiques plus anciennes. Les sédiments marins sont généralement riches en calcaire et ont un aspect clair, ce qui explique la teinte pâle de la plupart des terrains visibles.

Les sols de la république dominicaine sont caractéristiques de la topographie du pays. Sur les pentes abruptes, les sols sont peu épais et riches en calcaire. Sur les plaines alluviales on observe des sols plus profonds et de meilleure qualité. Dans les régions montagneuses les sols sont façonnés par l'érosion hydrique. Ces sols sont très peu profonds et de mauvaise qualité. On distingue ainsi:

- les sols de montagne ;
- les sols très peu évolués ;
- les sols peu évolués ;
- les sols évolués ;
- les sols sédimentaires.

VI.2.4. Réseau hydrographique

La République Dominicaine est une région montagneuse, ce qui façonne le réseau hydrographique. La plus part des cours d'eau de la région sont courts et tortueux. Leurs débits dépendent des précipitations saisonnières. Le fleuve Artibonite (Rio Artibonito) est le fleuve le plus long (320 km). Il prend sa source dans la Cordillère Centrale de la République dominicaine à 1 000 mètres d'altitude à l'ouest de la localité de Burende (province de La Vega). Il dispose le long de son passage de plusieurs affluents portant des noms locaux : Rivière Blanche ; Rivière Boucan Carré ; Rivière Estère ; Rivière Fer à Cheval ; Rivière Gascogne ; Rivière Guay la amouc ; Rivière Libon ; Rivière Lociane ; Rivière Macasia ; Rivière Thomonde ; Rivière La Thème et Rivière La Tombe.

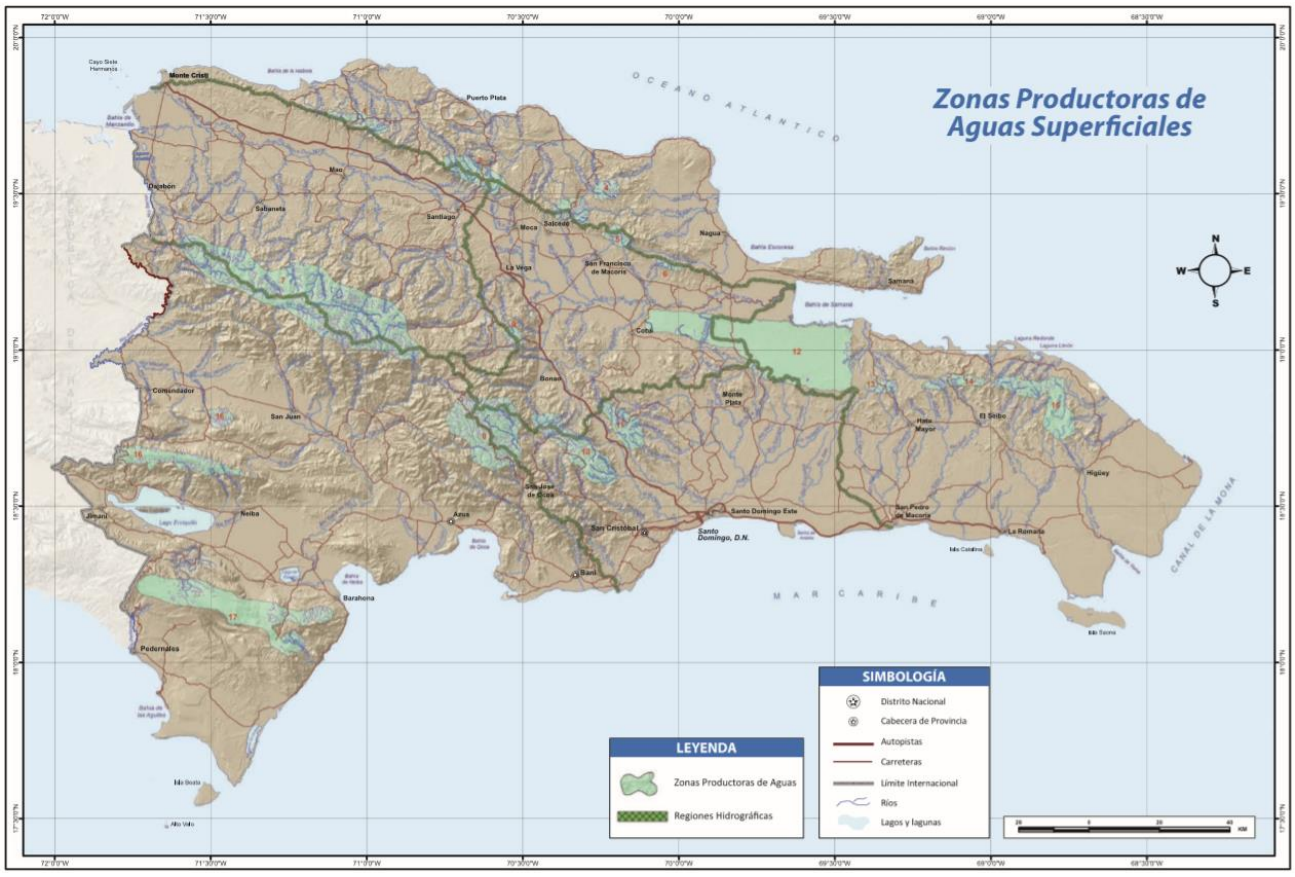


Figure 47: carte des cours d'eau de la République Dominicaine (source : atlas - ministère de l'environnement et des ressources naturelles – Republique Dominicaine, 2012).

VI.3. Diversité biologique de la province de Monté-Cristi

La République Dominicaine est l'un des refuges les plus importants pour la biodiversité. L'écosysteme est composé de forêts subtropicales, forêts sub-humides, forêts de montagnes. La flore et la faune d'ile sont composées d'especes, végetale et animal endemique et menacé de disparution. Ces écosystemes naturelles détiennent plus de 40 espèces menacées (dont beaucoup d'espèces endémiques), y compris les oiseaux en voie de disparition comme le Petrel

Pterodroma, la Selle Thrush Turdus swalesi, la Grive de Bicknell Catharus bicknelli et la Hispaniola Crossbill Loxia megaplaga; et aussi six grenouilles en voie d'extinction et deux mammifères terrestres endémiques : le paradoxus Hispaniolan solénodonte Solenodon et la hutia Plagiodontia aedium.

VI.4. Problématiques traitées et données utilisées

Sur le site de la province de Monté Cristi, nous souhaitons suivre l'évolution de l'occupation des sols, certains milieux étant fragiles et vulnérables. Il s'agit des mangroves et des forêts. Pour réaliser ce suivi nous produirons des cartographies proposant 18 classes identifiées sur le terrain. Les cartographies sont réalisées dans un premier temps avec des images optiques Sentinel-2, dans un deuxième temps avec des images radar Sentinel-1 et par la suite avec la combinaison des images optiques Sentinel-2 et images radar Sentinel-1.

VI.4.1. Données optiques

4 scenes Sentinel-2 ont été utilisé sur le site de la province de Monté Cristi (voire annexe 6).

VI.4.2. Données radar

43 scenes Sentinel-1 ont été utilisé sur le site de la province de Monté Cristi (Voire annexe 6).

VI.4.3. Données de référence

Les données de référence utilisées sont :

- une base de données vectorielles de toponymie (villes, cours d'eau, route) ;
- une carte des inondations (EIGEO, 2017) à 1/25000;
- une base de données des points GPS ;
- une base de données de photographies (photographies réalisées lors d'une mission du 10 au 22 mai 2018) ;
- un modèle numérique de terrain (SRTM) avec un pas de 30 m.

Nous avons également utilisé sur tous les sites d'étude des données de la plateforme Google Earth pour des contrôles localisés.

Partie I :

Chapitre III : Approches méthodologiques utilisées sur les différents sites tests

Sommaire

Introduction

I. Traitement des images satellitaires

I.1. Traitement des images optiques

I.1.1 Pansharpening

I.1.2 Composition colorée

I.2. Prétraitement des images radar

I.2.1. Calibration radiométrique

I.2.2. Correction géométrique

I.2.3. Filtrage

I.2.2.1. Filtre Boxcar

I.2.2.2. Filtre temporel

I.2.2.3. Filtre spatio-temporel

- *Filtre spatio-temporel de Quegan (Quegan et al, 2000)*

I.2.4. Conversion des informations d'intensité en décibel

II. Traitement d'extraction d'information : Méthode de classification pour la production de carte d'occupation du sol

II.1. Classification par Séparateurs à Vaste Marge (SVM)

II.2. Validation des résultats et indicateurs de bonne classification

III. Détection des changements

III.1. Détection des changements par la méthode des ondelettes

III.2. Détection de la déforestation

IV. Méthode d'inventaire forestière et d'estimation de la biomasse

V. Les outils logiciels utilisés

Introduction

Ce chapitre sera consacré aux différentes approches utilisées sur les sites tests pour répondre à nos objectifs. Nous présenterons successivement les aspects généraux concernant les prétraitements effectués sur les images satellitaires (optiques et radar) et les approches méthodologiques spécifiques appliquées sur chacun des sites. Il s'agit de :

- la méthode de production des cartographies d'occupation du sol par classification supervisée (SVM) accompagnée de la production des indicateurs de bonnes classifications (cette méthode est appliquée sur les sites du Togo (OKM et RFT) et de la RDC) ;
- les méthodes de détection de changements : l'analyse par décomposition en ondelettes et l'analyse par seuillage (ces approches sont pratiquées sur les sites de la Guyane française (Saint George de l'Oyapock) et de Saint-Domingue) ;
- La méthode d'inventaire utilisant le modelé de placette carrée temporaire et la quantification de biomasse et l'estimation de carbone sont réalisées sur les sites de l'OKM et RFT.

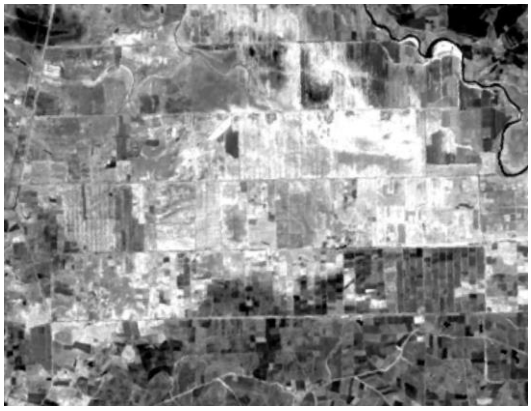
I. Les aspects généraux de prétraitements des images satellitaires

I.1. Prétraitement des données optiques

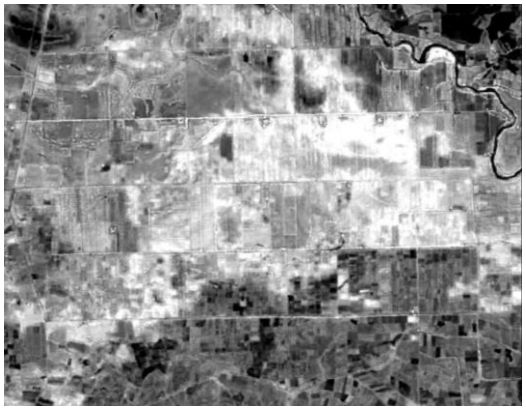
I.1.1 Pansharpening

Sur les images optiques Sentinel-2 et Landsat nous avons réalisé un prétraitement consistant à réaliser la fusion de bandes spectrales de tailles de pixel différentes. Il s'agit de la technique *de pansharpening.* Elle consiste à fusionner les bandes spectrales panchromatiques mieux résolues avec les autres bandes multi-spectrales moins résolues. Le produit obtenu après *pansharpening* présente la résolution spectrale des bandes multi spectrales tout en se rapprochant à terme de la résolution spatiale des bandes panchromatiques mieux résolues (Gemine et al, 2015). *Le pansharpening* constitue une étape préliminaire importante qui améliore la lisibilité des bandes multi spectrales, pour de nombreuses utilisations en télédétection telles que la détection des changements, la détection des objets de petites tailles, l'analyse et l'interprétation visuelle des images, l'amélioration de la précision des classifications.

Pour les images Landsat-8 par exemple, la bande panchromatique (0.500 – 0.680 µm) a une taille de pixel de 15 m. La taille initiale de pixel est de 30 m. Après *le pansharpening*, toutes bandes spectrales auront une taille de pixel de 15 m (figure 48). Pour les images Sentinel-2, quatre bandes (2, 3, 4 et 8) ont une taille de pixel de 10 m, 6 bandes (5, 6, 7, 8A, 10 et 11) ont une taille de pixel de 20 m et 3 autres (1, 9, 12) ont une taille de pixel de 60 m. Après l'étape du *pansharpening* toute les bandes auront 10 m pour taille de pixel (figure 49).



Band 5 - Near Infrared (0.845 – 0.885 µ – pixel = 30 m)



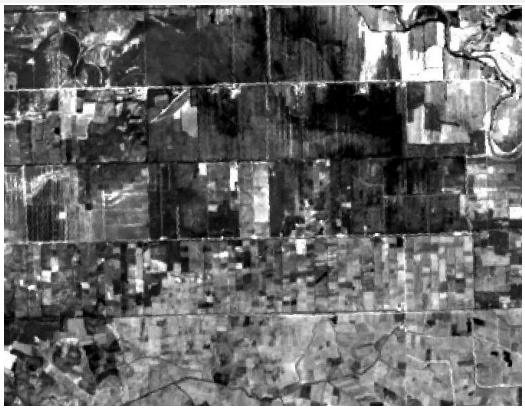
Band 5 - Near Infrared (0.845 – 0.885 µ – pixel = 15 m)



Band 4 – Red (0.630 – 0.680 µ pixel = 30 m)



Band 4 – Red (0.630 – 0.680 µ pixel = 15 m)



Band 3 – Green (0.525 – 0.600 µ pixel = 30 m)



Band 3 – Green (0.525 – 0.600 µ pixel = 15 m)

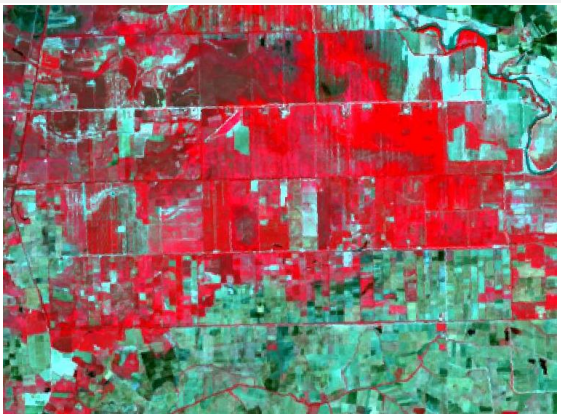


Image landsat-8 avant le panshapening Composition colorrée RVB (R=Band 5 ; V= Band 4 ; B= Band 3)

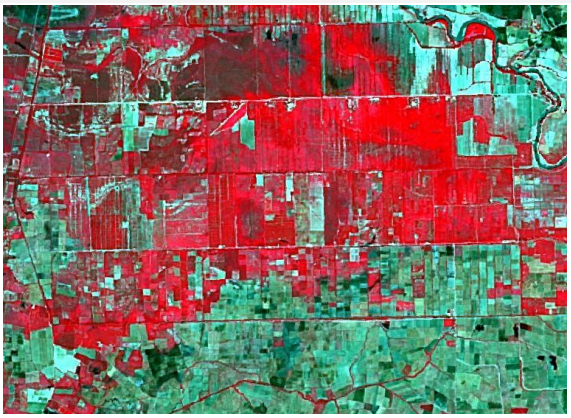
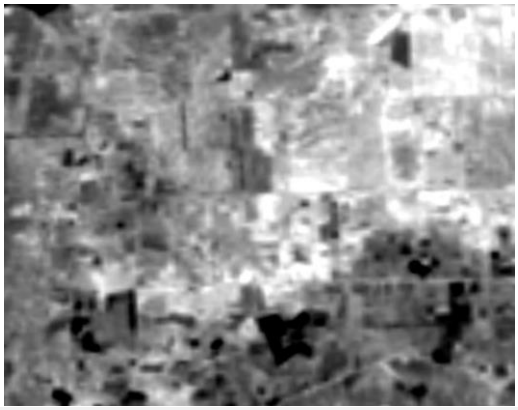
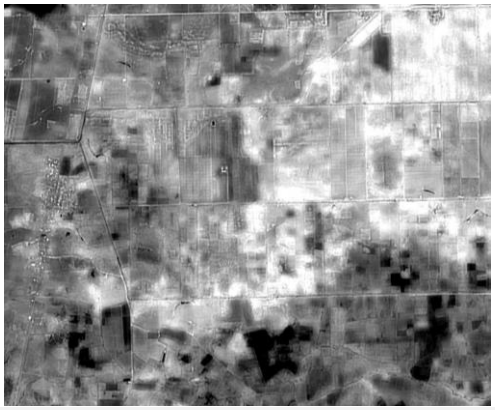


Image landsat-8 aprés le pansharpening: Composition colorrée RVB (R=Band 5 ; V= Band 4 ; B= Band 3)

Figure 48: Illustration comparative des bandes d'image Landsat-8 brute et les bandes d'image landsat-8 après le pansharpening sur la zone de Saint-Domingue



Band 9 – Water vapour (0.945 µ pixel = 60 m)



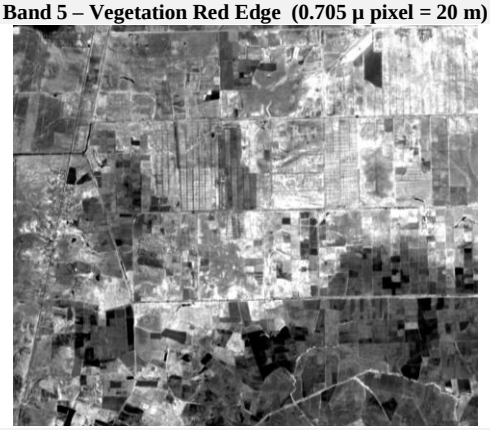
Band 9 – Water vapour (0.945 µ pixel = 10 m)



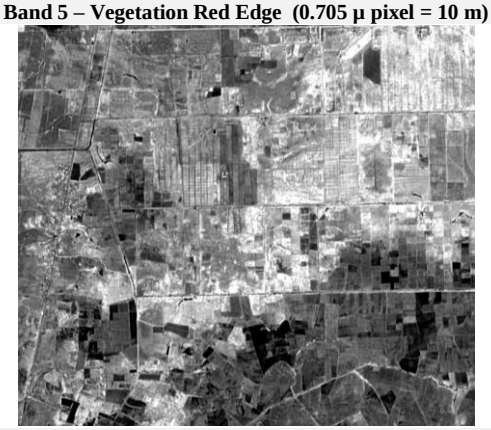
Band 5 – Vegetation Red Edge (0.705 µ pixel = 20 m)



Band 5 – Vegetation Red Edge (0.705 µ pixel = 10 m)



Band 8 – Near Infrared (0.842 µ pixel = 10 m)



Band 8 – Near Infrared (0.842 µ pixel = 10 m)

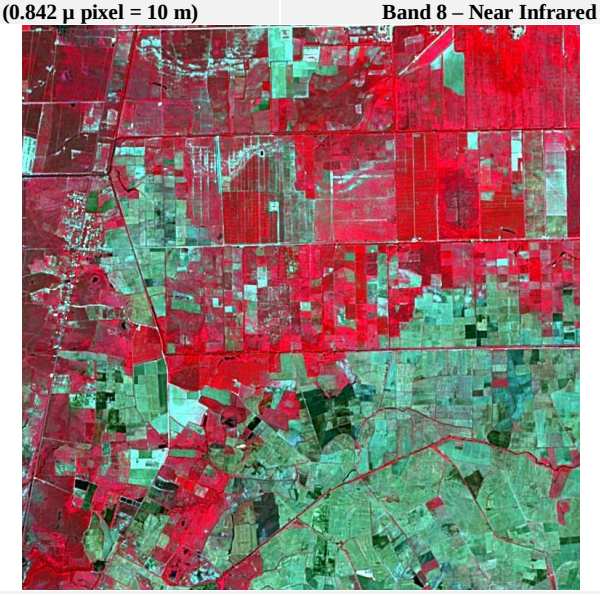


Image Sentinel-2 aprés le pansharpening: Composition colorée RVB (R=Band 8 ; V= Band 4 ; B= Band 3)

Figure 49: Illustration comparative des bandes d'image Sentinel-2 et les bandes d'image Sentinel-2 après le pansharpening sur la zone de Saint-Domingue

I.2. Prétraitement des données radar

Les images radar Sentinel-1 que nous avons utilisées ont subi plusieurs étapes de prétraitement. Ces étapes sont (figure 50):

- la correction géométrique;
- la calibration radiométrique ;
- la réduction du chatoiement par un filtrage ;
- la conversion des informations d'intensité des images radar en décibel.

La figure 50 montre la schématisation des étapes de traitements réalisés sur les images Sentinel-1.

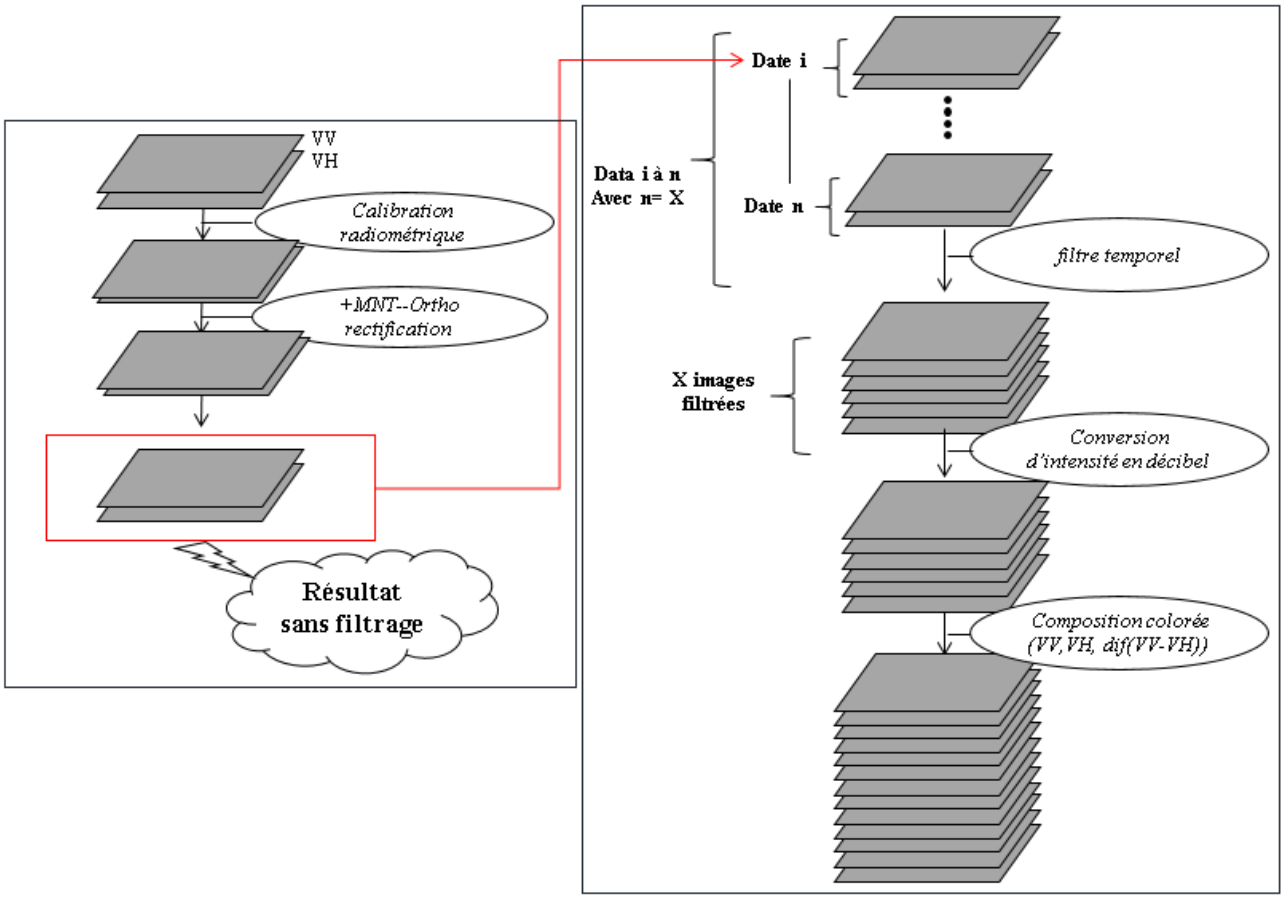


Figure 50: Schématisation des étapes de traitements réalisés sur les images Sentinel-1

I.2.1. Correction géométrique

Plus d'informations sur le géo-référencement et l'ortho-rectification des images sont proposées dans l'ouvrage de Schreier (1993). Les images Sentinel-1 brutes SLC sont en géométrie radar. Les images résultantes de la calibration radiométrique restent en géométrie radar. Pour passer de la géométrie radar en géométrie terrestre plane on applique le géo-référencement. Après le géo-référencement on obtient des ortho-images en coordonnées géographiques. Sur nos différents sites tests nous avons utilisé le model numérique (MNT) de la mission Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) pour corriger les effets du relief. La taille du pixel des données SRTM est de 30 m. Elles sont disponibles sur le site https://earthexplorer.usgs.gov/. Outre sa

gratuité, nous avons utilisé ces données (SRTM 30 m) car le relief est relativement faible sur nos différents sites d'étude.

Image sans correction géométrique Image avec correction géométrique

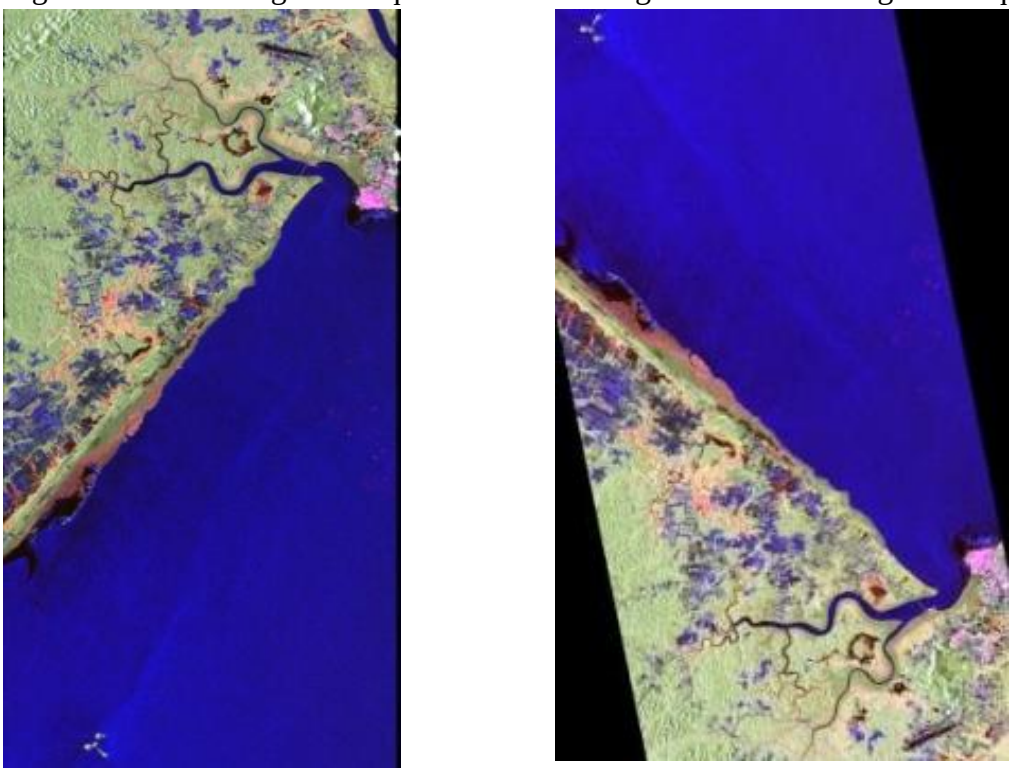


Figure 51: Illustration d'image Sentinel-1 en orbite montante sur la ville de Cayenne et Guyane sans et avec correction géométrique (inversion Nord-Sud plus une rotation de 12°) (ENSG, 2014).

I.2.2. Calibration radiométrique

Les images Sentinel-1 que nous avons utilisées sont des produits GRD dont les comptes sont enregistrés en valeur numérique. La calibration radiométrique dans notre cas consiste à convertir des valeurs numériques en variable physique du coefficient de rétrodiffusion (σ^o) radar en supposant le terrain horizontal plat. Une table de correspondance dépendant de l'angle de visée distale permet d'obtenir la valeur physique du coefficient de rétrodiffusion (σ^o). Cette opération est réalisée pour les deux polarisations VV, VH. Ainsi on obtient après calibration radiométrique la valeur physique du coefficient de rétrodiffusion radar en supposant le terrain horizontal plat. En cas de terrain avec relief, on observe sur les images les effets de relief discutés dans la section I.2.1.3.

I.2.3. Filtrage

Comme nous l'avons évoqué dans la section II.2 les images radar présentent un bruit appelé chatoiement qui les dégrade et les rend dans la plupart des cas non utilisables en l'état. Pour rappel, le chatoiement est causé par des interférences constructives, destructives et aléatoires

des ondes réfléchies de façon dispersée par les diffuseurs élémentaires au sein de chaque cellule de résolution (Elachi, 1988). La présence du chatoiement réduit ainsi la lisibilité de l'image et rend plus difficile l'extraction de l'information. Il est donc utile, dans certains cas, de réduire l'effet du chatoiement avant l'interprétation et l'analyse des images. Pour ce faire on utilise le filtrage des images. L'enjeu du filtrage est de préserver les contours tout en améliorant la radiométrie par réduction de la variabilité du chatoiement. Il existe plusieurs stratégies de filtrage : le filtrage spatial simple appelé *Boxcar* (ou traitement multi-vues), le filtrage spatio-temporel et filtrage temporel.

I.2.2.1. Filtre Boxcar

Le filtre « Boxcar » effectue un moyennage sur un voisinage de taille fixe sur l'ensemble de l'image. C'est une application directe de la moyenne glissante utilisée pour les images. La taille et la forme de la fenêtre sont fixes sur toute l'image. Ce filtre dégrade la résolution spatiale au profit de la résolution radiométrique (diminution du chatoiement).

I.2.2.2. Filtre temporel

Le filtre temporel est une simple moyenne ou un filtre médian, appliqué à l'intensité d'une série temporelle de pixels d'une même polarisation. Le filtre temporel nécessite plusieurs acquisitions dans la même géométrie.

I.2.2.3. Filtre spatio-temporel

Le filtre spatio-temporel nécessite plusieurs acquisitions dans la même géométrie d'acquisition. Ce filtre dégrade peu la résolution spatiale, conserve les contours et les informations temporelles pour améliorer la résolution radiométrique.

Dans le cadre de notre étude, nous avons testé le filtre spatio-temporel de Quegan (Quegan et al. (2000)).

Ce filtre permet d'améliorer la qualité des données à partir d'une séquence sur une même zone acquise dans la même géométrie. IL utilise une moyenne spatiale et temporelle pondérée donnant une plus grande importance à la date filtrée dans la polarisation considérée. Ainsi s'il y a au total 10, 20 ou 55 scènes d'image dans la même géométrie d'acquisition avec la même polarisation, après l'application du filtre de Quegan on obtient à la sortie 10, 20 ou 55 scènes filtrées.

La figure 48 et 49 présente l'illustration en polarisation VV et VH des résultats de l'application du filtre de Quegan sur une pile de 43 images Sentinel-1 avec une fenêtre spatiale de 7 x 7 pixels sur le site de Saint-Domingue.

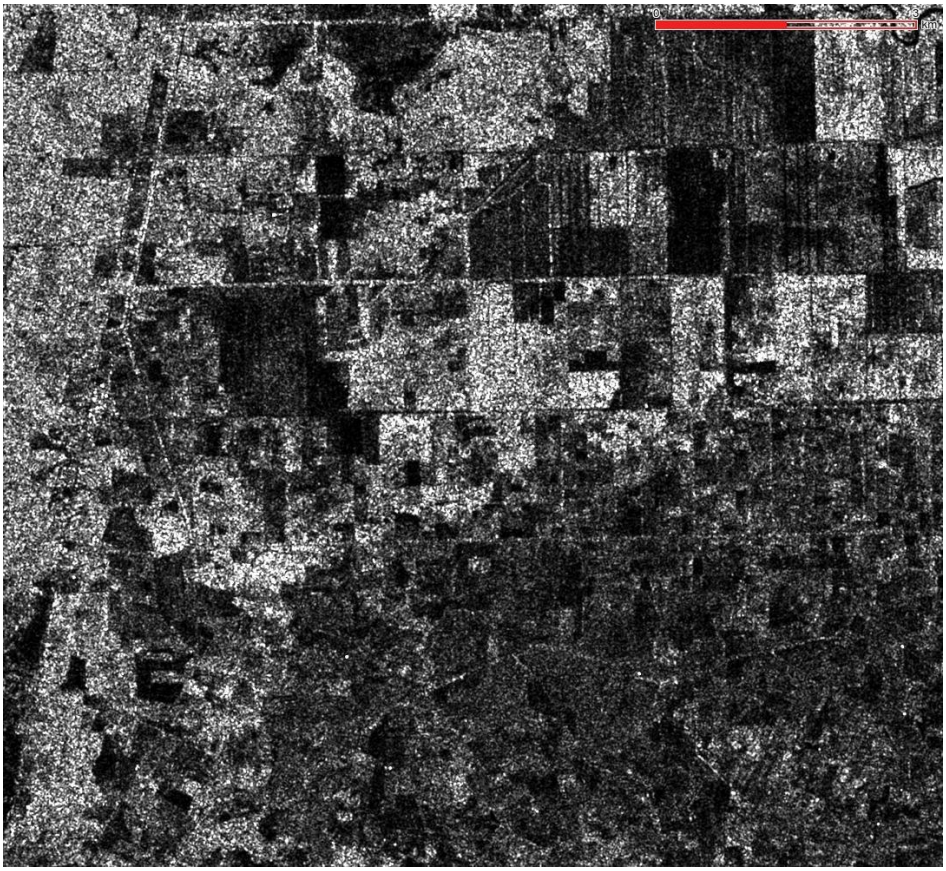


Figure 52: Illustration de la bande VH en décibel d'une image Sentinel-1 sur la zone de Monté Cristi en République Dominicaine

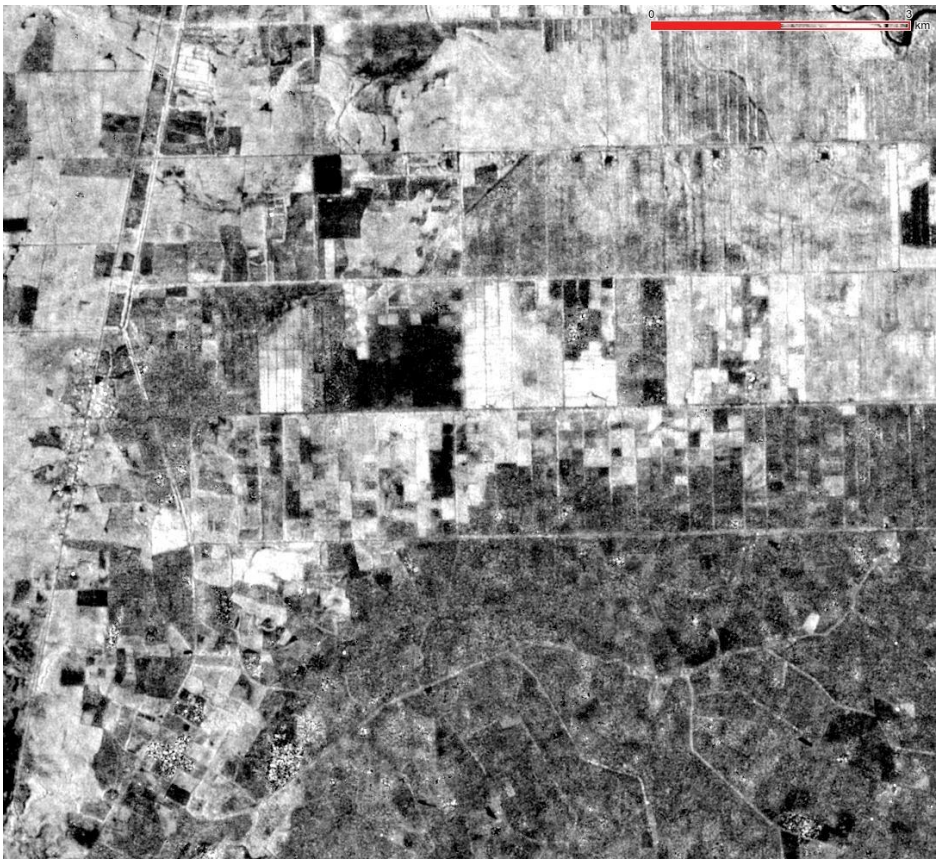


Figure 53: Résultat de l'application du filtre de Quegan sur la bande VH en décibel de 43 images (43 dates) Sentinel-1 sur le site de Monté Cristi en République Dominicaine. L'image filtrée est celle acquise à la date du 04/07/2017



Figure 54: Illustration de la bande VV en décibel d'une image Sentinel-1 sur la zone de Monté Cristi en République Dominicaine

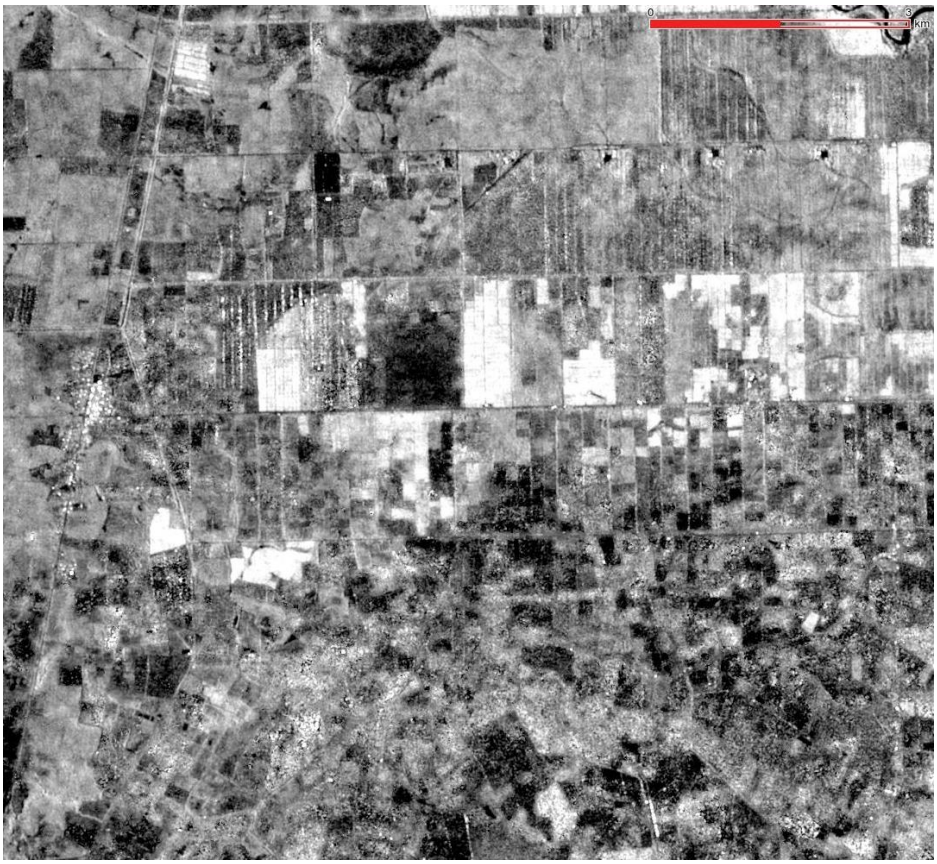


Figure 55: Résultat de l'application du filtre de Quegan sur la bande VV en décibel de 43 images (43 dates) Sentinel-1 sur le site de Monté Cristi en République Dominicaine. L'image filtrée est celle acquise à la date du 04/07/2017

I.2.3. Conversion des informations d'intensité en décibel

La visualisation et l'interprétation des images se trouvent dans certains cas facilitées par une transformation logarithmique des données calibrées, ortho-rectifiées et filtrées. Cette information permet de réduire l'étalement de la dynamique des fortes valeurs d'intensités (ou d'amplitudes) et d'augmenter la dynamique des faibles valeurs de celles-ci. Mais cette opération n'est pas indispensable pour comparer des sources de données différentes.

$$\sigma^{o}_{db} = 10\log(\sigma^{o})$$

Afin de faire une interprétation visuelle des images, nous avons réalisé une composition colorée avec dans le canal rouge la polarisation VV en décibel, dans le canal vert la polarisation VH en décibel et dans le canal bleu la différence VH, VV en décibel.

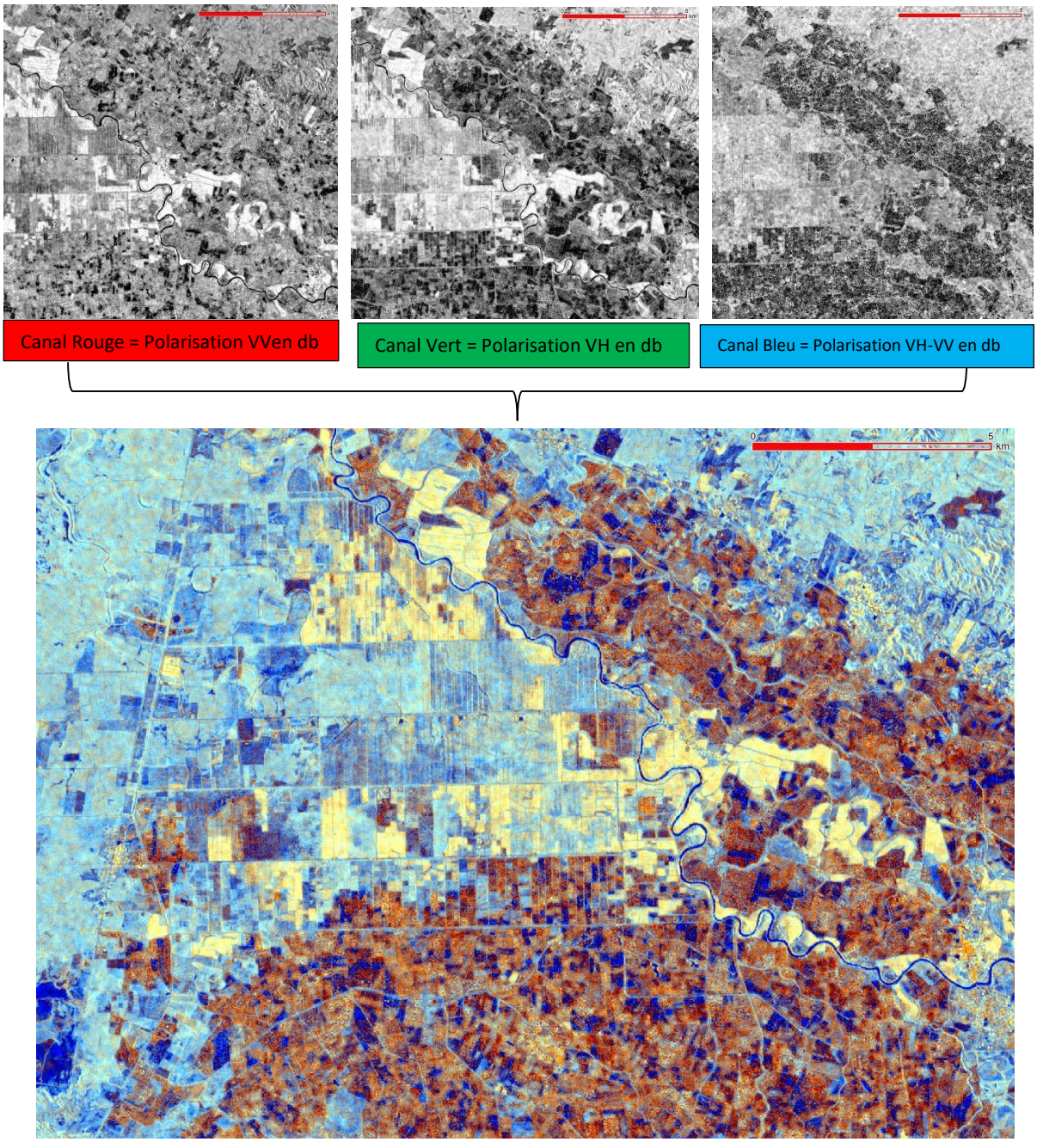


Figure 56: Illustration de la composition colorée d'une image Sentinel-1en decibel du 10 - 06 - 2017 sur le site de Monte-Cristo

II. Traitement d'extraction d'information : Méthode de classification pour la production de carte d'occupation du sol

Il existe plusieurs techniques et approches d'extraction numérique d'information dans les images satellitaires. La photo-interprétation et les classifications d'images sont les plus utilisées. La photo-interprétation est réalisée par interprétation visuelle suivie d'une numérisation des classes. La classification non-supervisée, la classification supervisée et la classification orientée objet sont les trois grandes familles de classifications les plus couramment utilisées. Les méthodes utilisent l'information radiométrique d'une ou de plusieurs bandes spectrales pour classer chaque pixel individuellement. La classification pixel à pixel des images satellites consiste à ranger ces derniers dans les catégories homogènes (classes d'information ou classes spectrales) (Cherel, 2010). Le résultat de la classification est une image avec des regroupements de pixels en fonction des classes thématiques que nous avons définies. Parmi les approches de classification supervisée les plus utilisées et selon la littérature se trouvent les ''Séparateurs à Vaste Marge'' (SVM) (Boser et al, 1992) et les ''Forêts Aléatoires'' (FA) (Breiman, 2001). Les Forêts Aléatoires (FA) sont maintenant largement utilisées en télédétection tant pour leur très bons résultats que pour leur capacité à traiter de gros jeux de données, ainsi que leur rapidité d'exécution (Pelletier et al. 2016). L'algorithme Séparateurs à Vaste Marge (SVM) présente des résultats légèrement supérieurs (1%) à ceux de l'algorithme de Forêts Aléatoires mais il est beaucoup moins rapide. Pour la réalisation de nos classifications, nous avons fait le choix de l'algorithme SVM.

Avant le choix de l'algorithme de classification, il est indispensable de faire une analyse de la séparabilité des classes d'occupation du sol à cartographié.

II.1. Analyse de la séparabilité des classes

Le choix des classes thématiques constitue une étape cruciale dans l'opération de l'extraction de l'information dans les images. Les classes doivent, à la fois, être bien discriminées entre elles sur les différentes images. Cela correspond à la notion de séparabilité spectrale des classes, et plus spécifiquement pour les zones couvertes de végétation. La séparabilité des classes d'occupation du sol est définie comme la distance entre les classes d'occupation du sol dans un espace caractéristique.

Dans notre étude, nous avons extrait pour les régions d'intérêts (ROI) des classes d'occupation du sol la valeur moyenne de la radiométrie comme indicateur de séparabilité.

II.2. Classification par Séparateurs à Vaste Marge (SVM)

Le Séparateur à Vaste Marge ou Support Vector Machine (SVM) en anglais a été développé en premier lieu dans les écrits de *Boser* (Boser et al, 1992). L'approche a ensuite été approfondie dans les travaux de *Vapnik* (Vapnik, 1998). Il fait partie des algorithmes les plus utilisés dans le domaine de la classification sur les images satellitaires en télédétection (Mountrakis et al, 2011). L'utilisation massive de SVM provient essentiellement du fait que ces algorithmes ont la capacité de fournir de bons résultats de classification même quand le nombre d'échantillons d'apprentissage pour un ROI donné est faible. Cette contrainte est assez récurrente dans les applications de la télédétection. Les méthodes SVMs ont également la capacité de minimiser les risques d'erreur de classification même sans connaissance à priori sur la distribution des données. Elles ont la possibilité d'adapter le noyau aux caractéristiques des données satellitaires (Regniers 2014). Les SVMs sont basés sur la recherche d'un hyperplan permettant de séparer des observations tout en maximisant la marge (la distance du point le plus proche de l'hyperplan). L'hyperplan optimal est défini comme une solution unique et peut être déterminé au moyen d'un nombre de points limites appelés « vecteurs de support » (Figure 45).

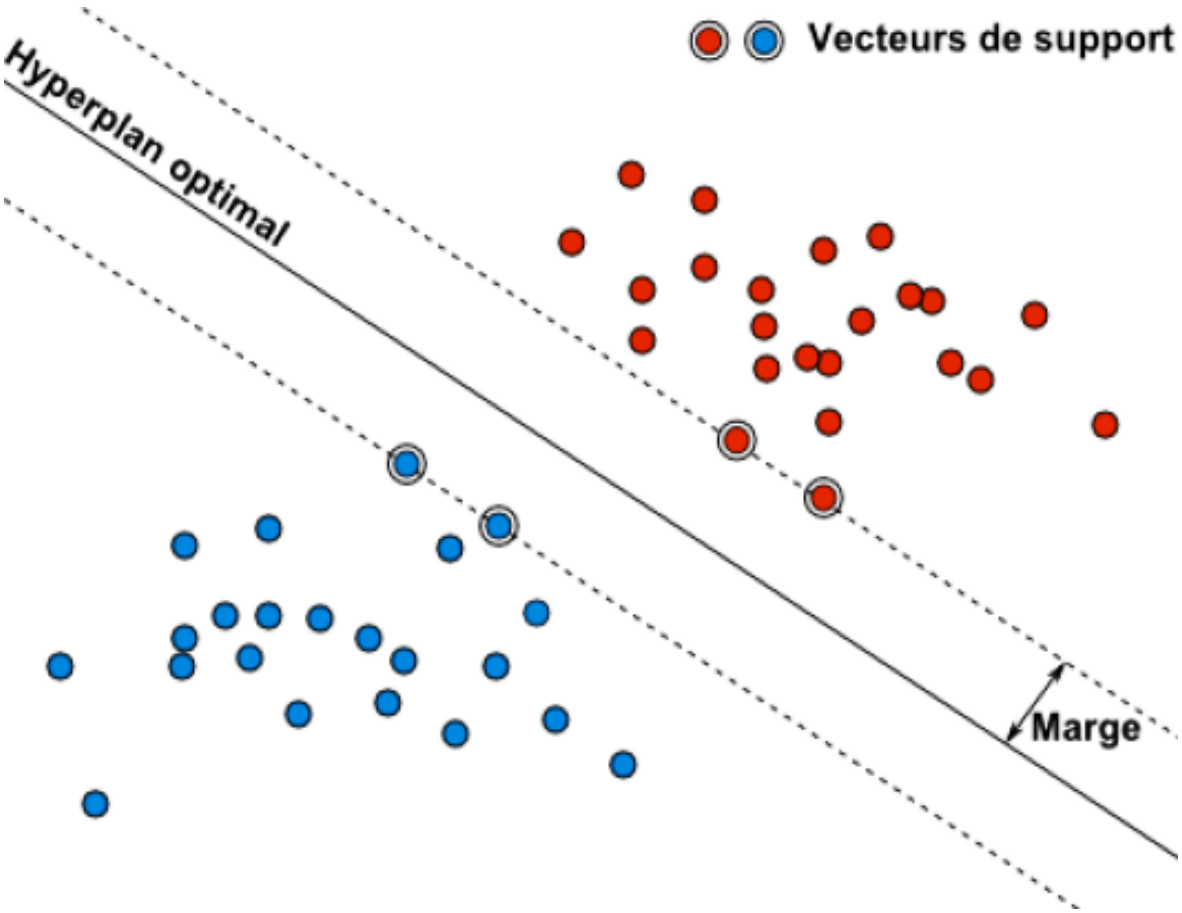


Figure 57: Exemple de fonctionnement du SVM dans le cas linéaire. Dans ce cas, 4 vecteurs de support (points) sont nécessaires pour définir l'hyperplan optimal

II.3. Méthode de validation des résultats de la classification

D'une façon générale les classifications ne deviennent véritablement utilisables comme cartographie qu'après une validation menée sur le terrain (ou avec des données de référence) et lorsqu'elles sont accompagnées de statistiques et d'indicateurs pertinents de qualité des résultats. Pour obtenir ces statistiques, il est important de prendre en compte certains paramètres. Il s'agit du nombre de points qui serviront pour la validation des différentes classes de la carte, sa distribution et les indicateurs statistiques dérivés.

Les aspects généraux sur le nombre de points de validation sont détaillés dans les articles des auteurs suivants (Hay, 1979, Congalton, 1991, Fenstermaker, 1991). Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser plus de 70 points pour la validation de chaque classe d'occupation du sol pour les classifications réalisées (comme le préconise les travaux de Congalton, 1991). La distribution des points dans les classes d'occupation est faite de manière aléatoire avec une contrainte de distance de 100 m entre point voisin pour éviter toute corrélation.

Nous avons produit à l'issue des vérifications une matrice de confusion et déduit les différents indicateurs de bonne classification.

Nous allons rappeler ici le contenu d'une matrice de confusion type (tableau 19) et les formules théoriques correspondant aux indicateurs.

Tableau 9: Exemple d'une matrice de confusion

Réalité / Classification		Données de référence (Réalité)					
	Classes	1	2	3	4	5	Total
Carte après classification	1	305	1	0	0	4	310
	2	3	56	0	1	0	60
	3	2	1	57	0	0	60
	4	2	0	0	38	0	40
	5	9	3	0	0	47	59
	Total	327	61	57	39	51	529

Cellule n 5, 2

Diagonale

La lecture de cette matrice se fait comme suit:

- en colonne : Parmi les 327 points de contrôle de la classe 1, 305 points ont bien été classifiés dans la carte comme appartenant à la classe 1. En revanche, la majorité des erreurs se manifestent par 9 points qui ont été classées dans la classe 5 ;

- en ligne : Parmi 59 points classés dans la carte comme appartenant à la classe 5, 47 sont réellement de la classe 5. 9 de ces points correspondent en réalité à la classe 1 d'après les données de référence ou les points de terrain ;

De la matrice de confusion sont extraits les indicateurs de qualité suivants (Congalton, 1991) : précision globale, précision producteur, précision utilisateur. Ces indicateurs nous paraissent plus pertinents que l'indicateur nommée Kappa que livrent les logiciels de classification (Kappa exprime la réduction proportionnelle de l'erreur obtenue par une classification, comparée à l'erreur obtenue par une classification complètement au hasard).

- *Précision globale ou overall Accuracy (OA):*

La précision globale indique le pourcentage des pixels bien classés par rapport au nombre total des pixels contrôlés dans la classification. Elle est donnée par l'expression suivante:

$$OA = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{c} n(i,i)$$

Dans cette équation la valeur **c** correspond au nombre de classes et n les entrées de la matrice de confusion et N le nombre total de pixels.

- *Précision producteur ou Producer's Accuracy (PA) :*

La précision du producteur ou précision d'omission est la probabilité pour un point appartenant à une certaine classe dans la vérité-terrain ou celle des données de référence d'être correctement classifié. Par exemple pour un point forêt c'est la probabilité que ce point soit effectivement classé forêt.

Il s'agit donc, contrairement à la précision globale, d'un indicateur de précision par classe. L'équation suivante permet d'obtenir pour la *j*-ème classe la précision producteur. Elle est équivalente au nombre de points de la *j*-éme classe correctement classés divisé par la somme sur la *j*-eme colonne de la matrice de confusion.

$$PA_j = \frac{n(j,j)}{\sum_{i=1}^{c} n(i,j)}$$

Cette mesure correspond à une forme d'indice de confiance que le producteur de la classification peut accorder à sa méthode de classification.

- *Précision utilisateur ou User's Accuracy (UA) :*

La précision de l'utilisateur ou précision de commission est la probabilité pour un point classé dans une certaine classe d'appartenir effectivement à cette classe. L'équation suivante permet d'obtenir pour la *i*-ème classe la précision utilisateur. Elle est équivalente au nombre de points de la *i*-éme classe correctement classés divisé par la somme sur la *i*-eme ligne de la matrice de confusion.

$$UA_i = \frac{n(i,i)}{\sum_{j=1}^{c} n(i,j)}$$

Cette mesure correspond à une forme d'indice de confiance que l'utilisateur de la carte produite peut accorder à cette carte. Il correspond également à l'erreur d'omission.

- *Précision F-score :*

La *F-Score* ou la *F-mesure* est l'indicateur de synthèse de la précision utilisateur et précision producteur pour évaluer les algorithmes de classification. Elle est donnée par la moyenne géométrique de la précision producteur et la précision utilisateur.

Ainsi pour la matrice de confusion du tableau 20 on obtient après calcul les résultats suivants :

Tableau 10: Résultats numériques de PA, UA, OA, F-Score appliqué à la matrice de confusion du tableau 19

Classe	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
PA (%)	93,27	91,80	100	97,43	92,15
UA (%)	98,28	93,33	95	95	79,66
F-Score	95,77	92,56	97,5	96,21	85,90
OA (%)	95,08				

III. Détection des changements

III.1. Détection de la déforestation par la méthode développée par Lardeux et al, 2018.

Cette méthode de détection des changements de déforestation a été développée par Lardeux et al, 2018. Nous avons appliqué cette méthode pour détecter des changements dans certains écosystèmes spécifiques comme les zones de mangroves et les zones de forêts sur le site de Monté Cristi. La méthode développée comporte trois grandes étapes:

- Prétraitement des données (calibration, ortho- rectification, filtrage temporel) ;
- Optimisation du contraste Forêt / Zone déforestée, notamment par l'atténuation de l'effet saisonnier sur la radiométrie ;
- Déclenchement d'une alerte suite à l'analyse de la variation de la radiométrie dans le temps, en réponse à un phénomène de changement ou de déforestation provoquant une forte variation de radiométrie.

Cette méthode analyse dans son ensemble la série temporelle issue des données Sentinel-1. Nous choisissons d'utiliser uniquement la polarisation VH car cette polarisation est plus sensible à la densité de végétation que la polarisation VV (Mermoz et Le Toan, 2016). Ainsi, une baisse significative de la réponse VH pourra correspondre à une surface déforestée.

Phase 1 : Prétraitement des données (ortho rectification, filtrage temporel) ;

La première étape consiste à réaliser les prétraitements sur la série temporelle d'image Sentinel-1. Les différents prétraitements ont été précédemment décrits dans la partie ***II.2. Traitement des données radar.***

Phase 2 : Optimisation du contraste Forêt / Zone déforestée ;

Après la phase de prétraitement, on obtient des séries d'images calibrées ortho-rectifiées et filtrées. En visualisant les profils temporels des images en polarisation VH en décibel, on remarque que sur les sites connus comme de la déforestation, il y a effectivement une baisse de la radiométrie. Les baisses les plus nettes correspondent au phénomène de déforestation. En revanche, on remarque qu'avant ou après ces différents évènements, la réponse du signal n'est pas constante. La variation de la radiométrie dans le temps pour une zone donnée semble correspondre à des effets saisonniers, lesquels risquent de venir perturber les analyses. Ainsi, l'humidité de surface et la densité de végétation peuvent varier au cours du temps et générer des variations de rétrodiffusion au sein de surfaces que l'on juge par ailleurs stables en termes d'occupation du sol.

Afin de réduire les effets évoqués précédemment et ainsi limiter les fausses alarmes, nous appliquons successivement les deux traitements suivant :

- Traitement 1: Ajustement des niveaux radiométriques de la série temporelle à partir de la radiométrie de référence estimée sur des zones de forêt dense et stable sur la série temporelle.

- Traitement 2 : Filtre passe-bas du premier ordre.

Le premier traitement consiste à considérer que la réponse d'une forêt dense humide sans changement anthropique est stable dans le temps.

Afin d'ajuster les niveaux radiométriques de la série temporelle sur l'ensemble de la scène d'étude, il a été estimé pour chaque date i une radiométrie de référence, $\widehat{I}_{(t)}^{Ref}$ Cette intensité de référence est ici calculée à partir de polygones correspondant à des surfaces de forêts denses stables sur l'ensemble de la série temporelle. Afin de permettre un suivi régulier, il est conseillé d'utiliser un grand nombre de polygones sur l'ensemble de la zone afin de ne pas biaiser la moyenne si une de ces surfaces venait à être déforestée. Le niveau de référence moyen (la moyenne des references) est alors calculé sur l'ensemble de la série temporelle, $< \widehat{I}_{(t)}^{Ref} >$, que l'on utilise alors pour ajuster l'ensemble de la série temporelle à l'aide de l'équation suivante :

$$\widehat{I}_{(t)}^{Ajust} = \frac{I_{(t)}}{\widehat{I}_{(t)}^{Ref}} . < \widehat{I}_{(t)}^{Ref} >$$

avec : I(t) représente la radiométrie d'un pixel à la date t.

La deuxième étape du traitement, appliqué aux résultats après recalage radiométrique, consiste à appliquer un filtre passe-bas du premier ordre sous la forme d'une moyenne pondérée exponentielle à la série temporelle. Cette moyenne pondérée exponentielle du pixel i à la date t $\widehat{E}_{i_t}$ se calcule de la façon suivante :

$$\widehat{E}_{i_t} = \sum_{n=0}^{t} \alpha(1-\alpha)^n E_{i_{t-n}}$$

Cette technique consiste ainsi à réaliser pour un pixel donné une moyenne (pondérée) temporelle cumulée dans le temps comme le montre l'équation ci-dessus.

avec :

- E_{it} : représente la moyenne temporelle à l'instant t.
- α : représente un coefficient pondérateur entre deux dates, compris entre 0 et 1.

L'intérêt pour réduire la remontée de la radiométrie liée à l'effet saisonnier est au-delà effectué avec le facteur référence qui consiste à pondérer la moyenne en donnant un poids moins

important à la nouvelle date, en utilisant par exemple une valeur de $\alpha = 0,3$ (valeur empirique retenue pour l'intérêt des résultats obtenus).

La contrepartie de cette technique est d'introduire un retard de détection de la déforestation en raison du poids plus important de la date antérieure (dependant de la frequence de mise à jour), c'est à dire un poids plus important à l'état de couvert forestier avant la date de déforestation.

Phase 3 : Déclenchement d'une alerte suite à l'analyse de la variation de la radiométrie

Une fois l'optimisation du contraste effectuée, une analyse des variations de réponse est menée en comparant les radiométries avant et après la date du changement observé. Ainsi, une surface sera identifiée comme ayant subi un changement à la date t si elle respecte les deux règles suivantes :

1. Une chute de radiométrie au-delà du seuil fixé à la date t par rapport à une date donnée. Ce seuil est ajustable mais les analyses ont montré qu'une chute de -1,5 dB était un bon indicateur dans le cas d'une déforestation rapide et à blanc (coupe à blanc).

2. Si le seuil ci-dessus a été atteint, la surface à la date t sera validée comme surface de déforestation si et seulement celle-ci montre également une chute minimum de radiométrie entre deux dates successives.

III.2. Détection des changements par la méthode des ondelettes.

Les détails théoriques et les formulations mathématiques de la méthode dite des ondelettes sont détaillés dans les écrits et articles de *A. M. Atto and G. Mercier, 2015 ; A. M. Atto, E. Trouvé, Y. Berthoumieu, and G. Mercier, 2013.*

Une ondelette est une fonction très bien localisée et possédant en plus une propriété fondamentale, une intégrale de valeur égale à 0, on dit alors qu'elle est de moment (premier moment ou 'moyenne') nul. De ce fait, si $\boldsymbol{f}$ est une fonction constante (non forcément nulle) et si $\boldsymbol{g}$ est une ondelette, alors le coefficient d'ondelette qui est le produit scalaire de la fonction $\boldsymbol{f}$ et $\boldsymbol{g}$ vaut 0 (en d'autres termes l'intégrale de la fonction k ($\boldsymbol{k= f*g}$), vaut 0). Une ondelette agit alors comme une différentielle (la dérivée d'une fonction constante vaut 0). Une ondelette peut également annuler des polynômes si elle a suffisamment de moments nuls (ce qui est le cas de plusieurs ondelettes). En ce sens, on peut l'utiliser pour calculer des variations autour d'une tendance.

Dans le cas de l'analyse des données de télédétection, la tendance est l'effet saisonnier et les variations autour de cette tendance seront capturées par des ondelettes. Ces variations contiennent alors des changements non liés aux variations saisonnières. C'est en ce sens que les

ondelettes sont un bon outil d'analyse différentielle (détection des changements) : car la variation vue par les ondelettes fait abstraction de la tendance globale (Phase I). Les ondelettes sont connues comme étant de bons descripteurs pour les textures (une texture est un ensemble structuré de singularités spatiales). Les ondelettes savent capturer des singularités en faisant abstraction de la tendance, comme expliqué ci-dessous (Phase II).

Phase I : Analyse différentielle : Recherche d'anomalies temporelles et rejet des zones non-suspectes ;

Lorsqu'on s'intéresse à des images radar en intensité ou amplitude, on est dans un contexte d'interactions multiplicatives et on va de ce fait remplacer les différentiations (car ce sont les interactions additives qu'on souhaite séparer) par des ratios. Dans le domaine des ondelettes, cela revient à une inférence algébrique où les coefficients sont obtenus par des produits pondérés de ratios associés aux données (on parlera de transformée en ondelettes géométrique). La transformée pouvant être en plus multi-échelles, on dispose d'un cadre qui permet :

- de calculer et comparer des ratios généralisés ;
- de calculer ces ratios à plusieurs échelles d'analyse ;
- de combiner plusieurs transformées en ondelettes pour avoir un cadre d'analyse encore plus riche.

L'application de cette première phase sur la zone d'intérêt vise à agréger les détails vus par différentes ondelettes géométriques pour calculer un indice de variation totale (somme des modules) pour chaque série temporelle associée à un pixel quelconque sur la région étudiée. La carte de ces indices de variation totale temporelle en ondelettes permet en particulier de caractériser les anomalies suivantes :

- les changements abrupts (type déforestation) : lorsque l'agrégation implique un ou un petit nombre de très grands indices ;
- les changements progressifs : lorsque l'agrégation implique un grand nombre de petits indices, mais significatifs.

Lorsqu'il n'y a pas de changements significatifs, l'indice résultant est faible. Donc, en pratique, un tel indice permet de rejeter toutes les zones associées à une faible variation totale pour se concentrer, en phase II d'analyse, sur des zones ayant un comportement singulier.

Phase II : analyse des textures locales des zones suspectes ;

La phase I a permis à la fois de réduire la dimensionnalité de la donnée et de fournir un paquet de séries temporelles associées à des comportements suspects. Pour caractériser de manière

précise les phénomènes ayant conduit à considérer une zone comme suspecte, nous proposons une analyse fine des textures locales pour chaque zone suspecte.

Pour cela, nous commençons par décomposer en ondelettes, chaque image de la série associée à une zone d'intérêt (nous nommerons « imagette » par la suite les extraits d'images de ces zones d'intérêt) pour extraire des attributs probabilistes de texture (un attribut pour chaque échelle d'une décomposition en ondelette multi-échelles). Ensuite, nous comparons ces attributs en utilisant une divergence de Kullback-Leibler : le degré de dissimilarité entre 2 imagettes (bi-date) est l'agrégation des divergences de Kullback-Leibler des coefficients de décomposition en ondelettes de ces imagettes. Et comme le satellite Sentinel-1 nous fournit une paire d'observations (polarisation VV et VH) de la même zone à chaque acquisition, nous construisons une matrice de divergence multi-date contenant les dissimilarités entre textures :

- VV dans la partie triangulaire inférieure et
- VH dans la partie triangulaire supérieure.

On dispose ainsi dans une même matrice, des changements associés à un couple quelconque d'imagettes de la même série, selon la polarisation. Ainsi, les changements visibles pourront être caractérisés précisément : changements abrupts, progressifs (lents ou rapides), récurrents, etc.

IV. Méthode d'inventaire des ressources forestières

Les inventaires réalisés sont faite dans le but de contrôler les produits cartographiques qui sont produites sur ces deux aires protégées. Il a été prévu d'utiliser ces données d'inventaire pour estimer les biomasses contenu dans les aires protégées mais faute de moyens disponibles pour la collecte des données cette activité n'est pas allé jusqu'au bout.

L'inventaire des ressources forestières est réalisé en suivant un plan d'échantillonnage, lequel est guidé par les résultats obtenus à l'issue de l'analyse des images satellitaires pour la production des cartes d'occupation du sol. Il consiste à installer un échantillonnage représentatif dans les zones de forêt sur les cartes d'occupation du sol. Le modèle de placette carrée temporaire est mis en place (Figure 53). Ainsi, pour notre étude et en fonction des moyens dont nous disposons, nous avons sélectionnée 50 placettes carrées de surface fixe de 625 m2 (25 m x 25 m). Ces placettes sont installées de façon aléatoire dans les classes de forêts denses et de forêts riveraines. Cette méthode d'inventaire forestier avec des placettes unitaires de 625 m² comme unité d'échantillonnage a déjà été utilisée par d'autres auteurs dans des études d'inventaire des ressources forestières (Kokou, 1998; Adou et al, 2005; Zapfack, 2005; Hall et Swaine, 1981). Au total, dans chaque réserve, une surface de 3,125 ha à été inventoriée.

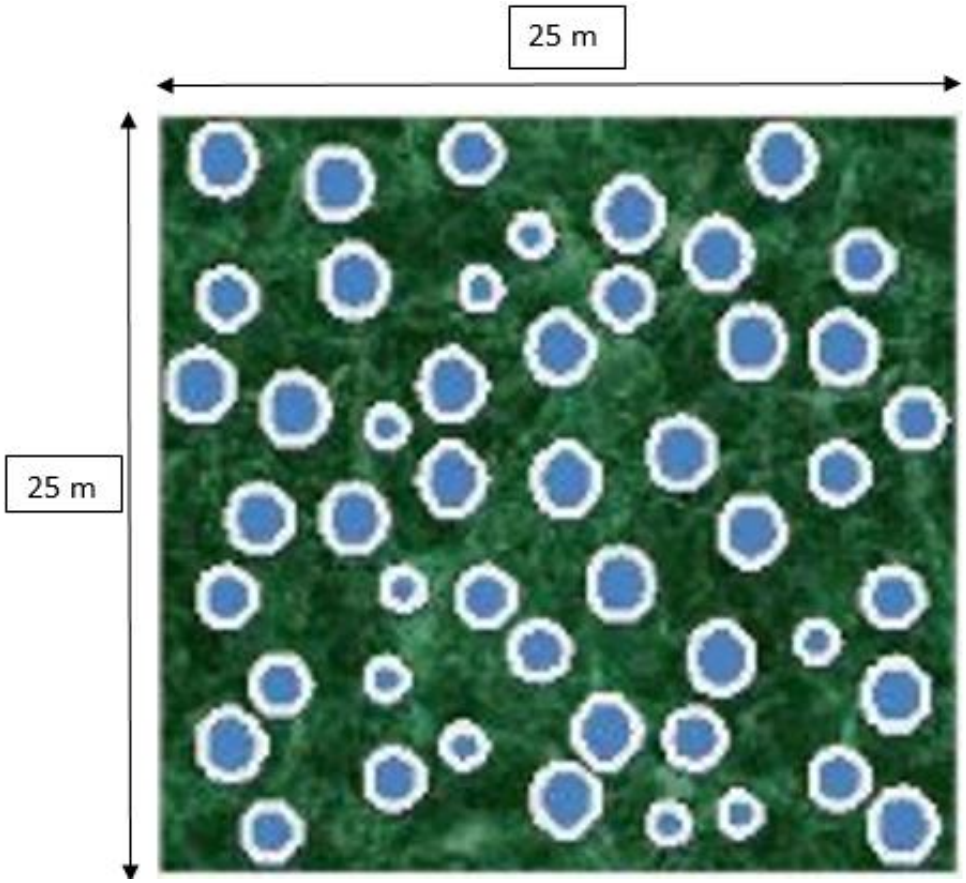
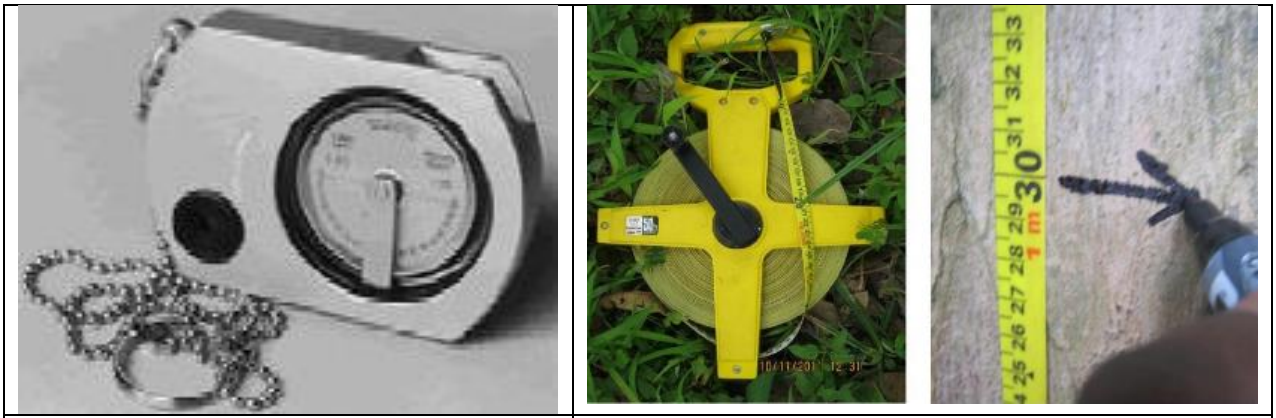


Figure 58: Exemple de placette carrée d'inventaire avec 25 m de côté

Sur chaque parcelle nous avons enregistré les caractéristiques dendrométriques suivantes :

- Type d'espèces (l'essence) ;
- la hauteur du fût : elle est mesurée à l'aide d'un clisimètre (SUUNTO PM5-1520) ;
- le diamètre à 1,30 m : elle est mesurée à l'aide du ruban forestier.

Ces paramètres sont enregistrés pour chaque essence ou individu dont le diamètre à 1,30 m est supérieur ou égale à 10 cm (seules les espèces ligneuses d'arbres et arbustes entrent dans cette catégorie).



Clisimète	Ruban forestier

Figure 59: Instruments de mesures lors des inventaires forestiers (Ruban forestier et)

V. Les outils logiciels utilisés

Dans l'ensemble de notre recherche, nous avons fait le choix d'utiliser les outils logiciels libres d'accès pour le traitement et l'analyse des données. Ces outils sont:

- **SNAP :** le logiciel SNAP ou plate-forme d'application Sentinel réunit les boîtes à outils Sentinel. Cette plate-forme est développée pour pouvoir exploiter les données du programme Copernicus. Les fonctions de base du logiciel sont : ouvrir un produit, explorer les composants du produit tels que des bandes, des masques et des grilles de points de rattachement. Les outils de navigation et la fonctionnalité d'information sur les pixels représentent également certaines des fonctionnalités de base. Les boîtes à outils Sentinel contiennent des outils de manipulation d'images capables de traiter des images de plusieurs giga-pixels. Elles sont donc adaptées pour travailler avec des images satellites de grandes tailles (http://step.esa.int/main/download/).

  Nous avons utilisé le logiciel SNAP essentiellement pour les prétraitements des images radar Sentinel-1. Notamment :

  - la correction géométrique;
  - la calibration radiométrique.

- **OrfeoToolBox :** ORFEO ToolBox (OTB) est une librairie open-source de traitement d'image. Elle est construite à partir de la librairie de traitement d'image ITK et propose des fonctionnalités adaptées à la télédétection et particulièrement aux images de très haute résolution spatiale. Elle est distribuée sous la licence libre CeCILL (similaire à la GNU/GPL) pour encourager les contributions des utilisateurs. La plupart des fonctionnalités sont adaptées au traitement de très grandes images en utilisant des méthodes de streaming et multithreading autant que possible (http://ids.equipex-geosud.fr/logiciels-libres). Entre autres, OTB propose un grand nombre de fonctions documentées telles que :

  - Accès aux images : lecture/écriture optimisées pour la plupart des formats d'images de télédétection, accès aux métas données, visualisation ;
  - Filtrage : flou, débruitage, enhancement ;
  - Extraction d'information : points d'intérêts, alignements, lignes ;
  - Segmentation : croissance de régions, lignes de partage des eaux, lignes de niveaux ;
  - Classification : K-means, SVM, RF, champs de Markov ;
  - Détection de changements.

  Ce logiciel est utilisé pour faire les classifications avec l'algorithme Random Forest (RF).

- **QGIS :** QGIS est un logiciel SIG (système d'information géographique) libre multiplate-forme publié sous licence GPL. Le développement a débuté en mai 2002 et est sorti en tant que projet sur SourceForge en juin 2002. Il était également appelé Quantum GIS jusqu'à la version 1.9 (https://www.qgis.org/fr/site/).

  Nous avons utilisé cette plate-forme SIG pour faire toutes les analyses, traitements spatiaux et cartes d'occupation du sol que nous avons produits dans ce travail.

Partie II :
Applications, Présentations et Discussions des résultats

Dans cette partie II, les méthodologies présentées précédemment nous conduiront aux études du chapitre IV (écosystèmes tropicaux sec) puis des chapitres V, VI VII (écosystèmes tropicaux humides).

Chapitre IV :

Analyse diachronique de l'impact des conflits sur l'évolution de l'occupation des sols dans le Paysage des Virunga autour du Parc National des Virunga (PNVi) en RDC. (Période de 1987 à 2017) ;

Chapitre V :

Évaluation de la capacité de séquestration du carbone des galeries forestières des aires protégées du Togo : Cas de la réserve de faune de Togodo (RFT) et de la réserve de biosphère d'Oti – Keran – Mandourie (OKM).

Chapitre VI :

Etude de cas en Guyane : Caractérisation détaillée des classes d'occupation du sol sur la plaine littorale de Kourou et Application de la décomposition en ondelettes pour la détection et la caractérisation des changements dans la zone située autour du pont reliant Saint-Georges de l'Oyapock et l'état d'Amapa au Brésil.

Chapitre VII :

Suivi des écosystèmes fragiles et vulnérables de la province de Monte Cristi en République Dominicaine.

Partie II :

Chapitre IV : Analyse diachronique de l'impact des conflits armés sur l'évolution de l'occupation des sols dans le Paysage des Virunga autour du Parc National des Virunga (PNVi) en RDC. (Période de 1987 à 2017) ;

Sommaire

Introduction

I. Analyse visuelle et Sélection des classes d'occupation des sols
II. Production des cartographies d'occupation des sols
  II.1. Etat du paysage des Virunga en 1987
  II.2. Etat du paysage des Virunga en 1997
  II.3. Etat du paysage des Virunga en 2007
  II.4. Etat du paysage des Virunga en 2017
III. Analyse de la déforestation entre 1987 et 2017
  III.1 Analyse de la déforestation 1987 – 1997
  III.2 Analyse de la déforestation 1997 – 2007
  III.3. Analyse de la déforestation 2007 – 2017
  III.4. Analyse de la déforestation 1987 – 2017
IV. Discussion des résultats

Introduction

Comme nous l'avons évoqué dans la description des sites, le paysage des Virunga est un ensemble comprenant le PNVi, l'un des parcs le plus important en Afrique de part sa diversité biologique et son importance économique. Cette section présente les résultats des analyses des images satellites depuis 1987 jusqu'en 2017. Cette analyse a permis de localiser les zones de changements dus à la déforestation et aux autres perturbations des massifs forestiers. Nous avons fait le lien entre la déforestation et les différentes périodes de conflits armés qui ont eu lieu dans cette région depuis les années 80. Ainsi ce chapitre présente l'impact des différents conflits armés sur la déforestation dans l'écosystème forestier du paysage des Virunga.

Les images satellites analysées sont des images des capteurs Landsat et Sentinel-2 acquises principalement en tout début et en fin des saisons pluvieuses (les mois de janvier, février, juin et juillet). Nous avons choisi ces périodes car la couverture nuageuse est faible et l'état de la végétation permet de faire une bonne discrimination des différents types de couverts végétaux.

Dans ce chapitre il sera présenté :

- L'analyse visuelle et la sélection des classes d'occupation des sols ;
- Les résultats de la production des cartes d'occupation du sol et les résultats statistiques pour chaque période d'analyse ;
- Les résultats de la production des cartes de déforestation et les résultats statistiques relatifs aux variations du couvert forestier.

I. L'analyse visuelle et la sélection des classes d'occupation des sols

Pour sélectionner les classes d'occupation du sol qui vont ensuite faire l'objet de cartographie nous nous sommes basés sur les observations de terrain et l'analyse visuelle des images. Les missions de terrain ont été réalisées en juillet 2014 et février 2015. Ces missions ont permis de parcourir tous le parc national des Virunga sur sa longueur, de la ville de Goma au Sud du parc à la ville de Bénis au Nord du parc pour prendre des point GPS.

Au total 8 classes d'occupation des sols sont identifiées. Le tableau 22 donne la liste et la caractérisation de ces classes.

Pour chaque date, une carte binaire forêt/ non forêt est produite en regroupant les 8 classes en deux grandes catégories :

- La classe de forêts : Forêts denses et forêts claires
- La classe de non-forêts : Savanes (arborées et arbustives), Savanes herbeuses, zones agricoles, zones urbaines (artificialisées), zones de sol nu, cours d'eau.

Tableau 11: Description des classes d'occupation des sols dans le paysage des Virunga (WWF-Goma, 2014)

N°1	Classes	Description	Classes binaires
1	Forêts denses	Il s'agit des écosystèmes composés des essences de feuillus à larges feuilles semi-décidues ou persistantes. La hauteur des arbres est supérieure à 15 m et un taux de couvert de la canopée est de 65%. La surface minimale considérée comme forêt en RDC est de 0,5ha.	Forêt
2	Forêts claires (perturbées)	Mosaïque d'arbres semi décidus ayant une couverture végétale inférieure à 65 % avec des arbres dont la hauteur est supérieure 14 m. Il s'agit des forêts denses où il y a eu des coupes de bois et d'exploitations forestières.	Forêt
3	Savanes (arbustives et arborées)	Il s'agit des zones avec des arbres dispersés de petites tailles. Il existe un couvert herbacé. En fonction de l'importance du couvert herbacé on distinguera des savanes arborées ou des savanes arbustives.	Non-forêt
4	Savanes herbacées	Il s'agit essentiellement de zones constituées d'espèces herbacées (graminées). Il s'agit aussi de zones de pâturages.	Non-forêt
5	Zones agricoles	Il s'agit de surfaces cultivées. On distingue également des zones cultivées et qui ont été abandonnées (zone de jachères)	Non-forêt
6	Zones urbaines	Il s'agit de zone d'habitations avec des constructions urbaines aménagées ou diffus	Non-forêt
7	Sol nu	Il s'agit de zones dénuées de végétation, les zones de carrières d'exploitation minière non végétalisée ou de flans de volcans dépourvus de végétation.	Non-forêt
8	Cours d'eau et rivière	Regroupent les cours d'eau, les rivières, les lacs ou les fleuves.	Non-forêt

L'histogramme de la figure 60 illustre la moyenne de la radiométrie pour chaque classe d'occupation du sol (définies dans le tableau 22) pour les bandes d'image Landsat-5 utilisées pour la cartographie de l'année 1987 (cette date est prise à cause de la disponibilté des données). D'après l'histogramme, les bandes 4, 5 et 7 apportent une contribution importante dans la séparabilité des classes définies.

Tableau 12 : Valeur moyenne de la radiometrique des bandes de Landsat par classe d'occupation du sol

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Forêts Denses	72,13	27,69	21,28	60,96	47,57	127,38	15,73
Forêts Claires	73,51	32,48	26,72	78,6	61,8	128,59	21,41
Savanes Arborées	79,01	34,14	30,93	68,84	77,92	135,99	31,7
Savanes Herbeuses	72,74	31,63	33,42	48,91	85,76	143,39	45,32
Agricoles	80,56	35,65	34,87	67,65	91,74	142,13	40,5
Zones Urbaines	87,02	39,57	43,03	53,1	88,39	145,99	54,72
Sols Nu	83,32	36	38,03	46,36	80,32	155,58	43,64
Cours d'eau	87,18	32,15	24,15	15,5	9,59	131,84	5,81

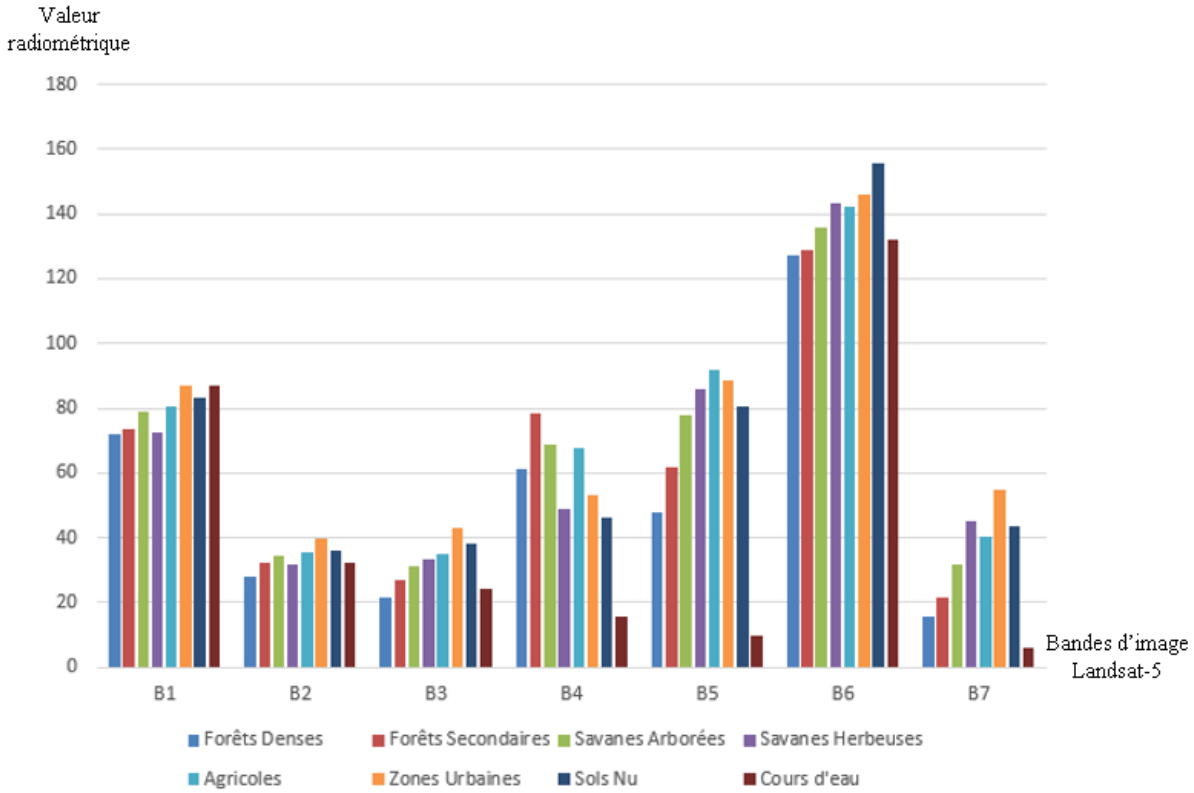


Figure 60: valeurs radiométriques des bandes spectrales d'une image Landsat-5 par classes d'occupation du sol

II. Résultats des classifications et production des cartes d'occupation du sol

Pour chaque période d'analyse, nous allons présenter la cartographie d'occupation du sol accompagnée des statistiques liées aux classifications. Par la suite les résultats statistiques surfaciques de chaque classe seront présentés après conversion des cartes finales du format raster vers le format vecteur.

II.1. Etat du paysage des Virunga en 1987

La cartographie d'occupation du sol de l'année 1987 est produite à partir d'images satellites du capteur Landsat-5. Vu que nous ne disposons pas de vérités terrain à cette période, nous avons utilisé la plateforme GoogleEarth pour faire la vérification et l'interprétation de certaines zones. En effet cette plateforme dispose d'un outil qui permet la navigation et la visualisation des images d'archive (historique) sur une zone donnée. Ainsi la validation de la classification est faite à partir des données historiques disponibles sur la plateforme. Au Total 7618 points ont été utilisé pour la validation de la carte. Il s'agit de points issus de l'échantillonnage aleatoire de point ayant servi pour la classification. La même approche est utilisée pour les autres dates.

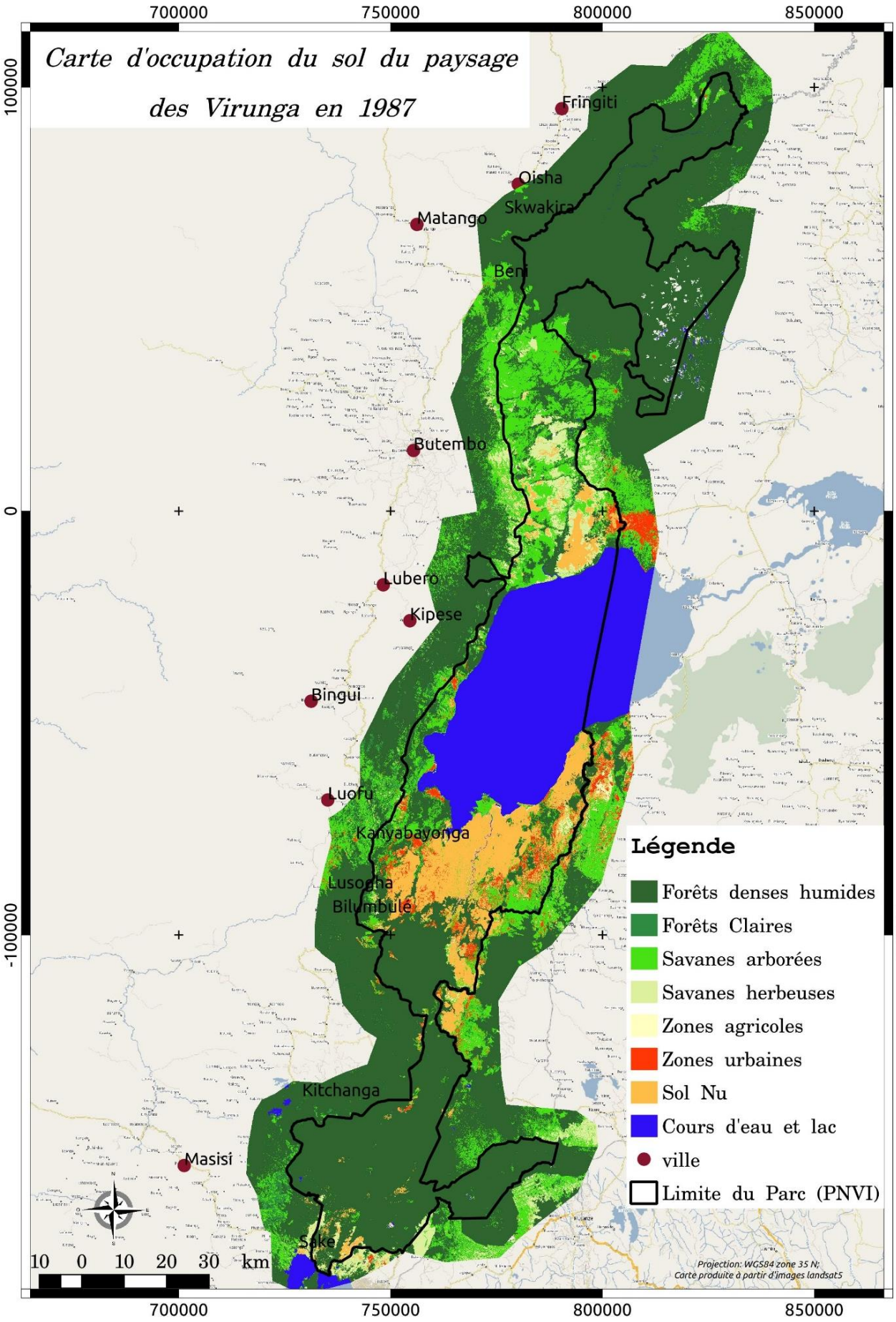


Figure 61: Carte d'occupation du sol du paysage des Virunga en 1987

Tableau 13: Matrice de confusion de la classification d'image de 1987

Classification / Réalité	Forêts denses	Forêts claires	Savanes Arborées	Savanes herbeuses	Agricoles	Eau	Urbains	Sol nu	Total	Producer Accuracy (%)
Forêts denses	985	6	2	7	0	0	0	0	1000	98,5
Forêts claires	7	975	18	0	0	0	0	0	1000	97,5
Savanes Arborées	0	18	959	5	6	4	8	0	1000	95,9
Savanes herbeuses	0	0	8	991	0	1	6	0	1006	98,5
Agricoles	0	0	39	6	560	6	2	0	613	91,4
Sol nu	0	0	6	6	0	979	8	0	999	98
Urbains	0	0	6	1	0	13	980	0	1000	98
Eau	0	0	0	0	0	0	0	1000	1000	100
Total	992	999	1038	1016	566	1003	1004	1000	7618	**Overlay Accuracy** = **97,2**
User Accuracy (%)	99,3	97,6	92,4	97,5	98,9	97,6	97,6	100		
F-Scores (%)	98,9	97,55	94,15	98	95,15	97,8	97,8	100		

La matrice de confusion montre une précision globale de plus de 97% et une précision producteur supérieure à 90 pour l'ensemble des 8 classes d'occupation des sols. On observe cependant certains points de confusion entre la classe savanes arborées et la classe agricoles ce qui explique la précision producteur moins élevée de la classe agricole que les autres classes (91,4%), et la précision utilisateur moins élevée que les autres au niveau de la classe savane arborées (92,4%). La précision utilisateur des autres classes est aussi au-dessus de 70%.

La classe ''cours d'eau et lac'' a une précision producteur et utilisateur de 100% permettant d'extraire sans omission ou commission toutes les surfaces liées à cette classe.

La confusion observée entre les classes savanes arborées et agricultures est liée probablement à la présence de grande plantation de café dans la zone à cette époque dont la signature spectrale s'apparente plus à des savanes arborées qu'à des zones agricoles.

Ces indicateurs statistiques montrent que la cartographie issue de cette classification est suffisamment fiable pour en sortir les statistiques surfaciques des classes d'occupation du sol (Girard et Girard 1999).

Tableau 14: Répartition des classes d'occupation du sol du paysage des Virunga en 1987

	Surface (ha)	Proportion
Forêts denses	953319	59,0%
Forêts perturbées	20554	1,3%
Savanes (arborées/ arbustive)	244953	15,2%
Savanes herbeuses	47798	3,0%
Agricole	12004	0,7%
Zones urbaines	31741	2,0%
Sols Nus	94751	5,9%
Cours d'eau	211697	13,1%
Total	1616817	100,0%

Dans le tableau 14 on retrouve la répartition des surfaces des différentes classes d'occupation des sols du paysage des Virunga. La classe forêt dense par exemple représenterait en 1987 une surface de 953320 ha soit une proportion de 59% de la surface totale du paysage des Virunga.

II.2. Etat du paysage des Virunga en 1997

La précision globale de la classification des mosaïques d'images landsat-5 et Landsat-7 pour l'année 1997 sur l'ensemble du paysage des Virunga est de 97%. L'ensemble des classes d'occupation des sols ont des précisions producteurs et utilisateurs supérieur à 90%. Ces statistiques montrent la qualité des résultats du traitement et d'extraction des classes (Tableau 15).

Tableau 15: Matrice de confusion de la classification d'image de 1997

Classification \ Réalité	Forêts denses	Forêts claires	Savanes Arborées	Savanes herbeuses	Agricole	Urbain	Sol nu	Eau	Total	Producer Accuracy (%)
Forêts denses	961	21	8	0	1	0	0	0	991	97
Forêt claire	36	929	34	1	0	0	0	0	1000	92,9
Savanes Arborées	10	24	960	5	1	0	0	0	1000	96
Savanes herbeuses	0	4	7	983	1	1	4	0	1000	98,3
Agricole	1	1	15	12	538	4	3	0	574	93,7
Urbain	0	0	0	1	0	690	0	0	691	99,9
Sol nu	0	0	0	10	0	4	986	0	1000	98,6
Eau	0	0	0	0	0	0	0	1000	1000	100
Total	1008	979	1024	1012	541	699	993	1000	7256	**Overlay Accuracy =**
User Accuracy (%)	95,3	94,9	93,8	97,1	99,4	98,7	99,3	100		
F Scores	96,2	93,9	94,9	97,7	96,55	99,3	98,95	100		**97,05**

Tableau 16: Répartition surfacique des classes d'occupation du sol du paysage des Virunga en 1997

	Surface (ha)	Proportion
Forêts denses	894760	55,3%
Forêts claires	34456	2,1%
Savanes (arborées/ arbustive)	152552	9,4%
Savanes herbeuses	144412	8,9%
Agricole	34069	2,1%
Zones urbaines	65561	4,1%
Sols Nus	79310	4,9%
Cours d'eau	211697	13,1%
Total	1616817	100,0%

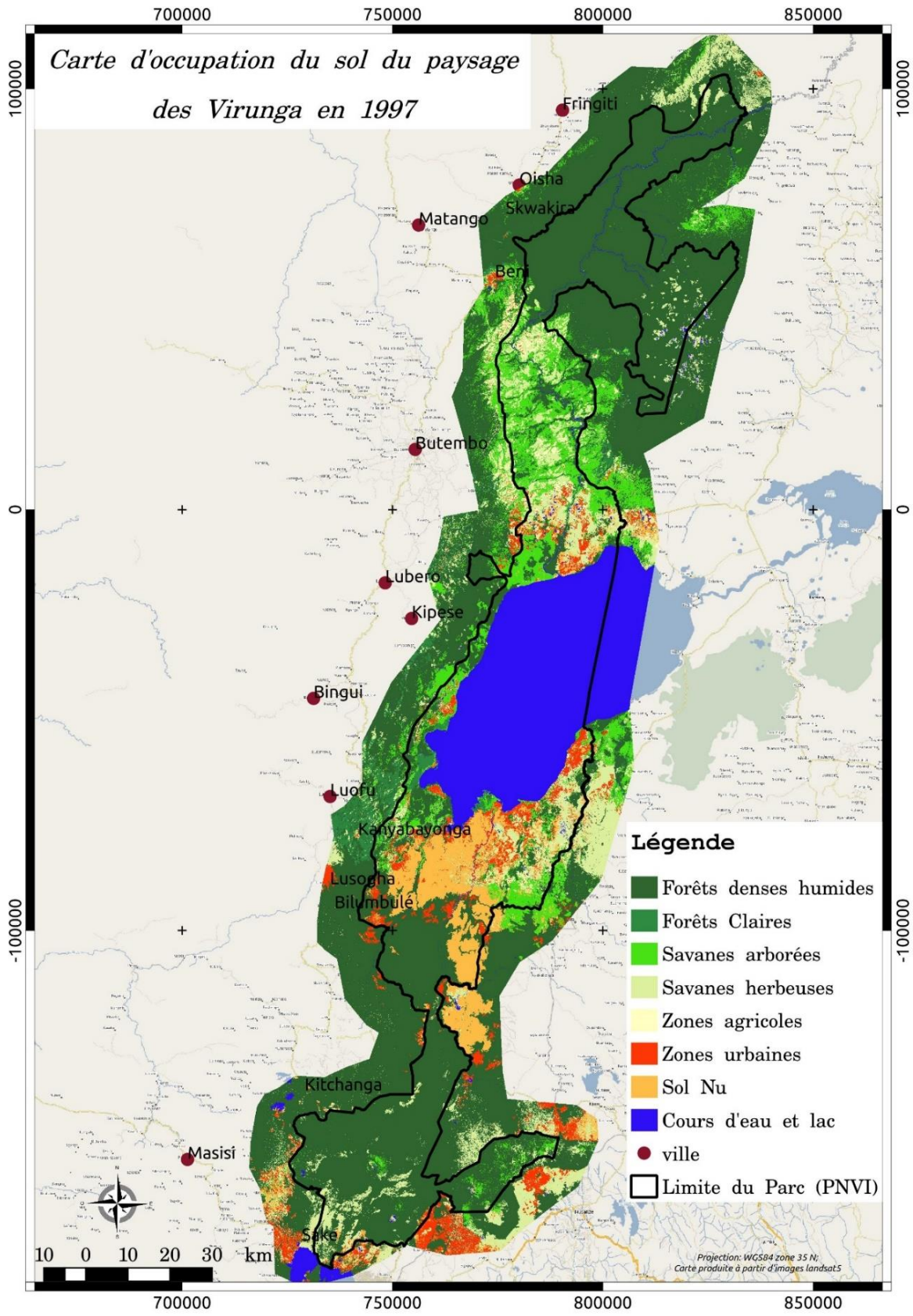


Figure 62: Carte d'occupation du sol du paysage des Virunga en 1997

L'analyse des surfaces occupées par chaque classe d'occupation du sol révèle que la forêt dense humide occupe une surface de 894760 ha soit 55% de la surface globale du paysage des Virunga. Le couvert de la forêt dense s'est réduit par rapport à 1987 où il représentrait 59% de

la surface totale (la surface de forêt en 1987 est de 953320 ha). Le tableau 27 présente la répartition surfacique des classes d'occupation du sol du paysage des Virunga en 1997.

II.3. Etat du paysage des Virunga en 2007

La précision globale de la classification sur les images Landsat-7 en 2007 sur l'ensemble du paysage des Virunga est de 96%. L'ensemble des classes d'occupation des sols ont des précisions producteurs et utilisateurs au-delà des 90%. La classe forêts denses et forêts perturbées ont respectivement des précisions producteurs de 95,5% et 97%. Ces statistiques montrent la qualité des résultats du traitement et d'extraction des classes (Tableau 17).

Tableau 17: Matrice de confusion de la classification d'image de 2007

Classification \ Réalité	Forêts denses	Forêts claires	Savane Arbustive	Savane herbeuse	Agricole	Urbain	Sol nu	Eau	Total	Producer Accuracy (%)
Forêts denses	955	36	7	0	1	0	0	1	1000	95,5
Forêt claire	26	970	4	0	0	0	0	0	1000	97
Savanes Arbustives	0	3	989	0	8	0	0	0	1000	98,9
Savanes herbeuses	10	3	2	967	13	5	0	0	1000	96,7
Agricole	0	1	17	12	874	7	0	0	911	95,9
Urbain	0	0	0	0	5	963	32	0	1000	96,3
Sol nu	0	0	0	4	0	64	932	0	1000	93,2
Eau	0	0	0	0	0	0	0	1000	1000	100
Total	991	1013	1019	983	901	1039	964	1001	7911	Overlay Accuracy =
User Accuracy (%)	96,4	95,8	97,1	98,4	97	92,7	96,7	100		
F-Scores (%)	96	96,4	98	97,5	96,4	94,5	94,9	100		**96,7**

Tableau 18:Répartition surfacique des classes d'occupation du sol du paysage des Virunga en 2007

	Surface (ha)	Proportion
Forêts denses	770841	47,7%
Forêts claires	3611	0,2%
Savanes (arborées/ arbustive)	173811	10,8%
Savanes herbeuses	276711	17,1%
Agricole	34375	2,1%
Zones urbaines	66145	4,1%
Sols Nus	79626	4,9%
Cours d'eau	211697	13,1%
Total	1616817	100,0%

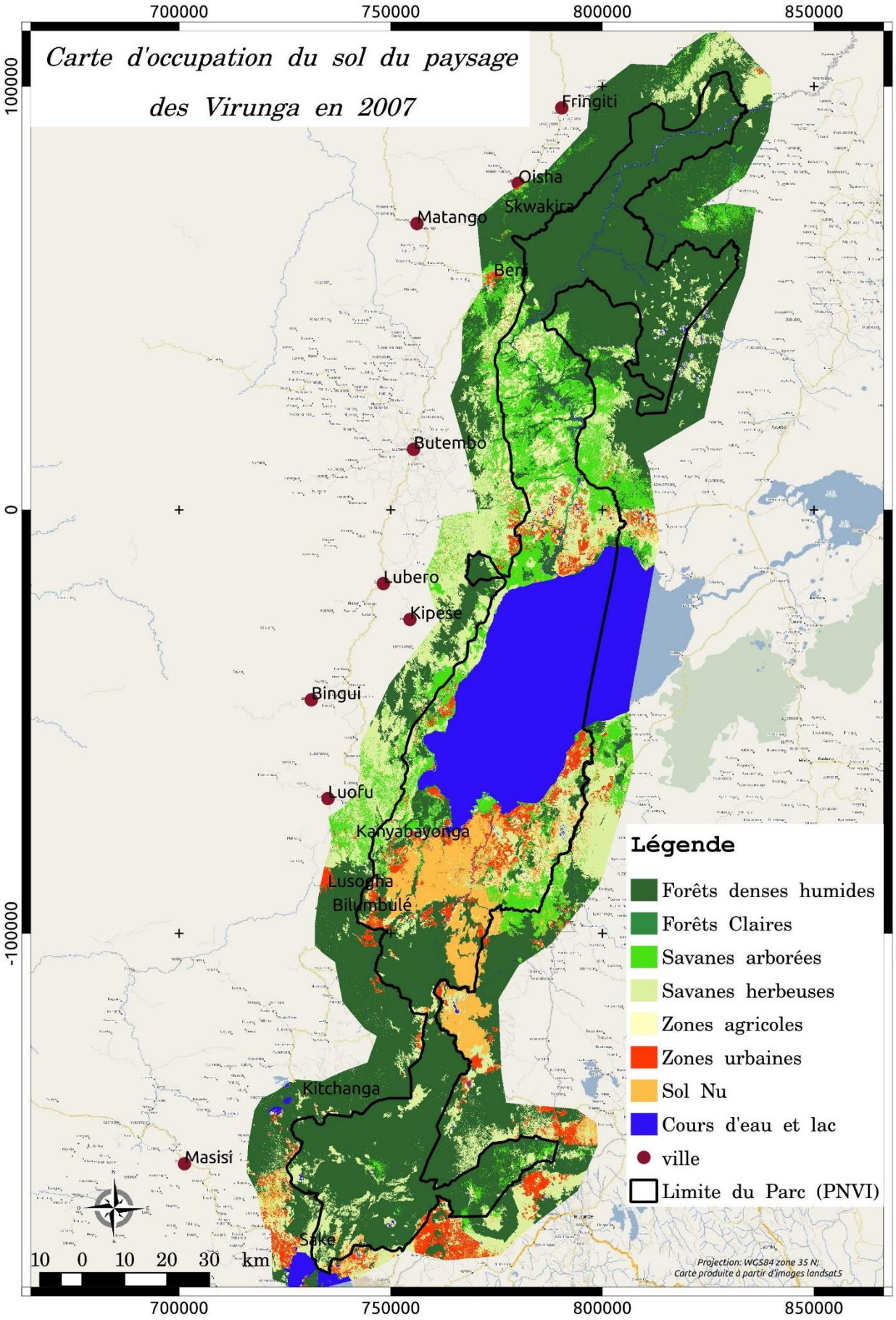


Figure 63:Carte d'occupation du sol du paysage des Virunga en 2007

L'analyse des surfaces occupées pour chaque classe d'occupation des sols révèle que la forêt dense occupe une surface de 770841 ha soit 47,7% de la surface globale du paysage des Virunga. Les forêts claires ou forêts perturbées occupent une surface de 3611 ha soit une proportion de 0,2%. Le tableau 29 présente la répartition surfacique des classes d'occupation du sol du paysage des Virunga en 2007.

II.4. Etat du paysage des Virunga en 2017

La précision globale de la classification sur les images Sentinel-2 en 2017 sur l'ensemble du paysage des Virunga est de 95,4%. L'ensemble des classes d'occupation des sols ont des précisions producteurs et utilisateurs au-delà des 90%. Sur cette classification, la classe zone ''sol nu'' est à une précision producteur de 90% inférieur à la précision producteur de toutes les autres classes. Cette valeur de précision producteur de la classe ''sol nu'' s'explique par la confusion observée entre cette classe et la classe ''Urbain ''.

Toutefois, ces statistiques montrent la qualité des résultats du traitement et d'extraction des classes (Tableau 19).

Tableau 19: Matrice de confusion de la classification d'image de 2017

Classification / Réalité	Forêts denses	Forêts claires	Savane Arbustive	Savane herbeuse	Agricole	Urbain	Sol nu	Eau	Total	Producer Accuracy (%)
Forêts denses	936	33	18	11	2	0	0	0	1000	94%
Forêt claire	20	976	2	2	0	0	0	0	1000	98%
Savanes Arbustives	5	6	971	0	18	0	0	0	1000	97%
Savanes herbeuses	6	0	16	956	16	6	0	0	1000	96%
Agricole	0	4	20	36	934	5	0	0	999	93%
Urbain	0	0	0	0	15	951	34	0	1000	95%
Sol nu	0	0	5	16	0	76	903	0	1000	90%
Eau	0	0	0	0	0	0	0	1000	1000	100
Total	967	1019	1032	1021	985	1038	937	1000	7911	Overlay Accuracy = **95,38**
User Accuracy (%)	96,8	95,8	94,1	93,6	94,8	91,6	96,4	100		
F-Scores (%)	95,4	96,9	95,55	94,8	93,9	93,3	93,2	100		

Pour s'assurer de l'homogénéité des traitements sur la période d'analyse, nous avons ramené toutes les classifications à une résolution de 15 m. ainsi, la classification de 2017 obtenue avec Sentinel-2 à 10 m de résolution est ré échantillonné à 15 m.

Cette manipulation est indispensable pour des analyses spatiales et le calcul des surfaces sur les différentes périodes de l'étude.



Figure 64: Photographies lors de mission de terrain dans le parc national des Virunga en Mai 2017 (Mission Kemavo)

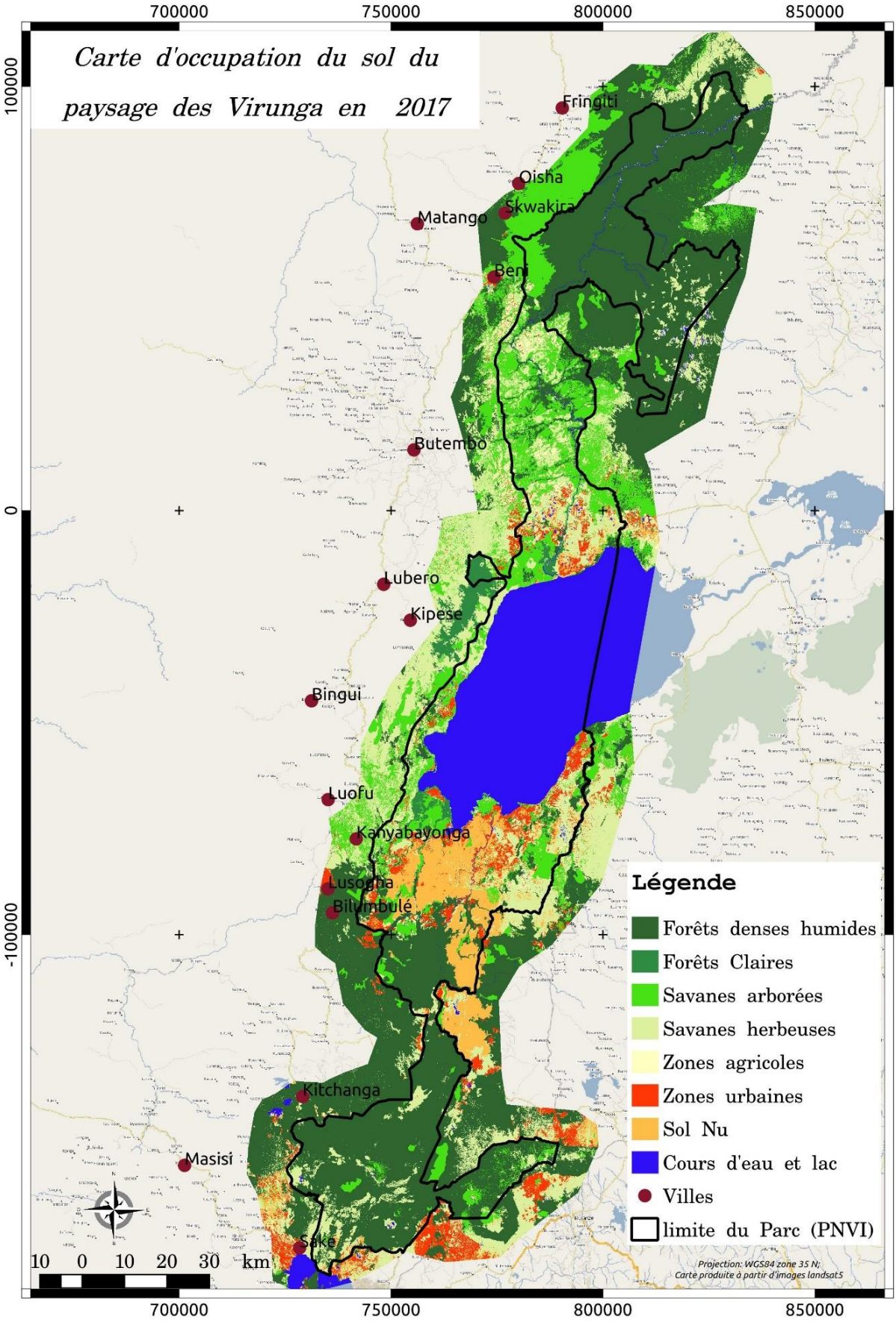


Figure 65: Carte d'occupation du sol du paysage des Virunga en 2017

La surface occupée par la classe forêts denses est de 684960 ha soit une proportion de 42,4% de la surface totale du paysage de Virunga. Cette surface était de 47,7% en 1997. La classe

forêts claires ou perturbés occupe une surface de 20107ha soit 1,2%. La surface de cette classe est de 3611ha en 2007. Entre 2007 et 2017 on observe une augmentation de la surface de cette classe. Cette augmentation correspond à une conversion de la classe ‘‘forêts denses’’ en ‘‘forêts claires’’.

Tableau 20: Répartition surfacique des classes d'occupation du sol du paysage des Virunga en 2017

	surface	Proportion
Forêts denses	684955	42,4%
Forêts claires	20107	1,2%
Savanes (arborées/ arbustive)	228110	14,1%
Savanes herbeuses	291395	18,0%
Agricole	33928	2,1%
Zones urbaines	66808	4,1%
Sols Nus	79817	4,9%
Cours d’eau	211697	13,1%
Total	1616817	100

III. Analyse de la déforestation entre 1987-2017

Sur la base des cartes d’occupation du sol de 1987, 1997, 2007 et 2017 nous avons produit des cartes binaires forêts non forêt pour chaque année. Les cartes de déforestation sont ainsi déduites des cartes binaires pour les périodes 1987-1997, 1997-2007, 2007-2017.

Tableau 21: Répartition des surfaces forêts /Non Forêt sur le paysage des Virunga en 1987, 1997, 2007 et 2017

	1987		1997		2007		2017	
	Surface	**Proportion**	**Surface**	**Proportion**	**Surface**	**Proportion**	**Surface**	**Proportion**
Forêt	973873	60,2%	929216	57,5%	774452	47,9%	705062	43,6%
Non Forêt	642944	39,8%	687601	42,5%	842365	52,1%	911755	56,4%
Total	1616817	100,0%	1616817	100,0%	1616817	100,0%	1616817	100,0%

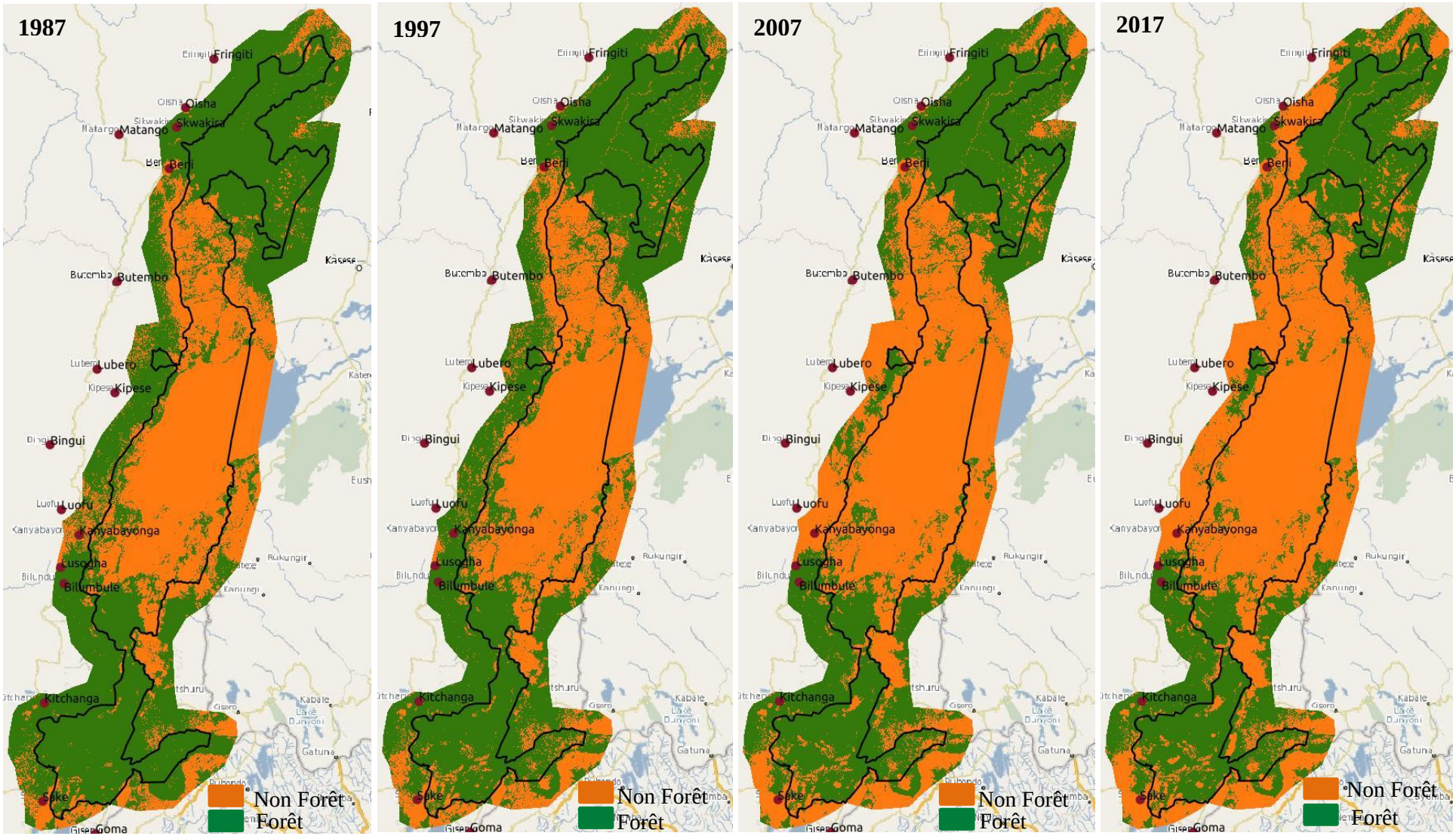


Figure 66:Cartographie binaire forêt/Non Forêt pour l'année 1987, 1997, 2007, 2017

III.1. Déforestation en 1987-1997

Sur la période de 1987 à 1997, la surface forestière sur l'ensemble du paysage des Virunga est passée de 973873 ha à 929216 ha soit une réduction de 44657 ha. Cette réduction correspond à la surface de déforestation sur cette période de 10 ans. Les zones de déforestation sont situées plus dans les zones périphériques du parc des Virunga autour des villes de Saké, Goma, au Sud, la ville de Kipesé et Lubero au Centre et la ville de Béni au Nord (Figure 67).

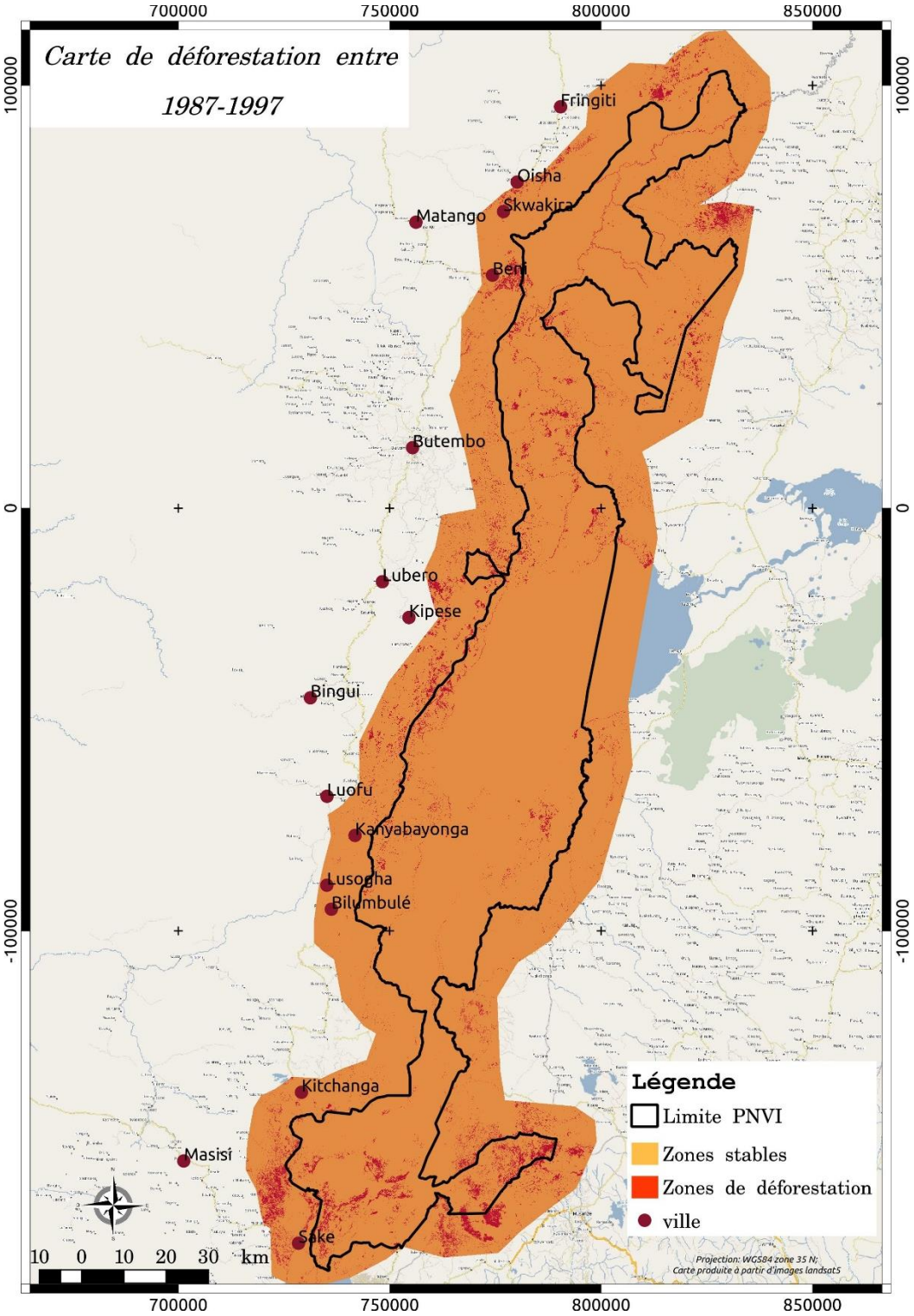


Figure 67:Carte de déforestation du paysage des Virunga entre 1987-1997

III.2. Déforestation en 1997-2007

Entre 1997 et 2007, la couverture forestière est passée de 929216 ha à 774452 ha soit une zone de déforestation de 154764 ha en 10 ans. Sur cette période on remarque que la surface de forêts converti en zone non forêts est d'environ 3 fois la réduction de surface de forêt qui a eu lieu entre 1987 et 1997. Spatialement ces zones de déforestation sont situées plus dans la zone centrale hors des limites du parc national des Virunga autours des localités de Kanyabayonga, Luoru, Kipesé et Lubero (Figure 68).

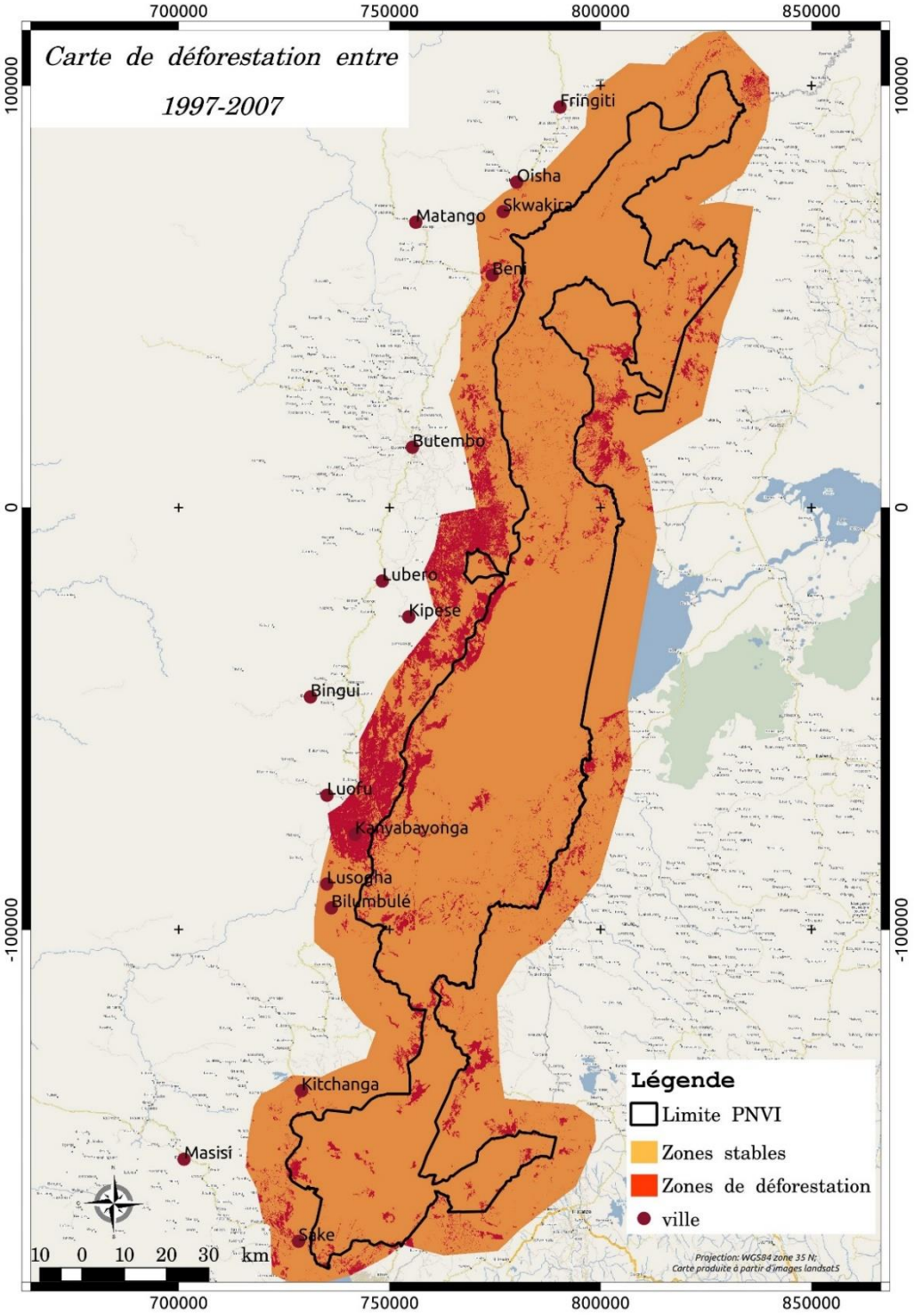


Figure 68: Carte de déforestation du paysage des Virunga entre 1997-2007

III.3. Déforestation en 2007-2017

En 2017 la surface forestière est de 705062 ha alors qu'elle couvrait une surface de 774452 ha en 2007. Au total 69390 ha sont convertis de forêt en non forêt sur cette période. En visualisant la carte de déforestation on constate que les zones de déforestations sont situées majoritairement au Nord du paysage de Virunga autour des localités de Beni, d'Oisha, de Skwakira et de Fringiti (Figure 69).

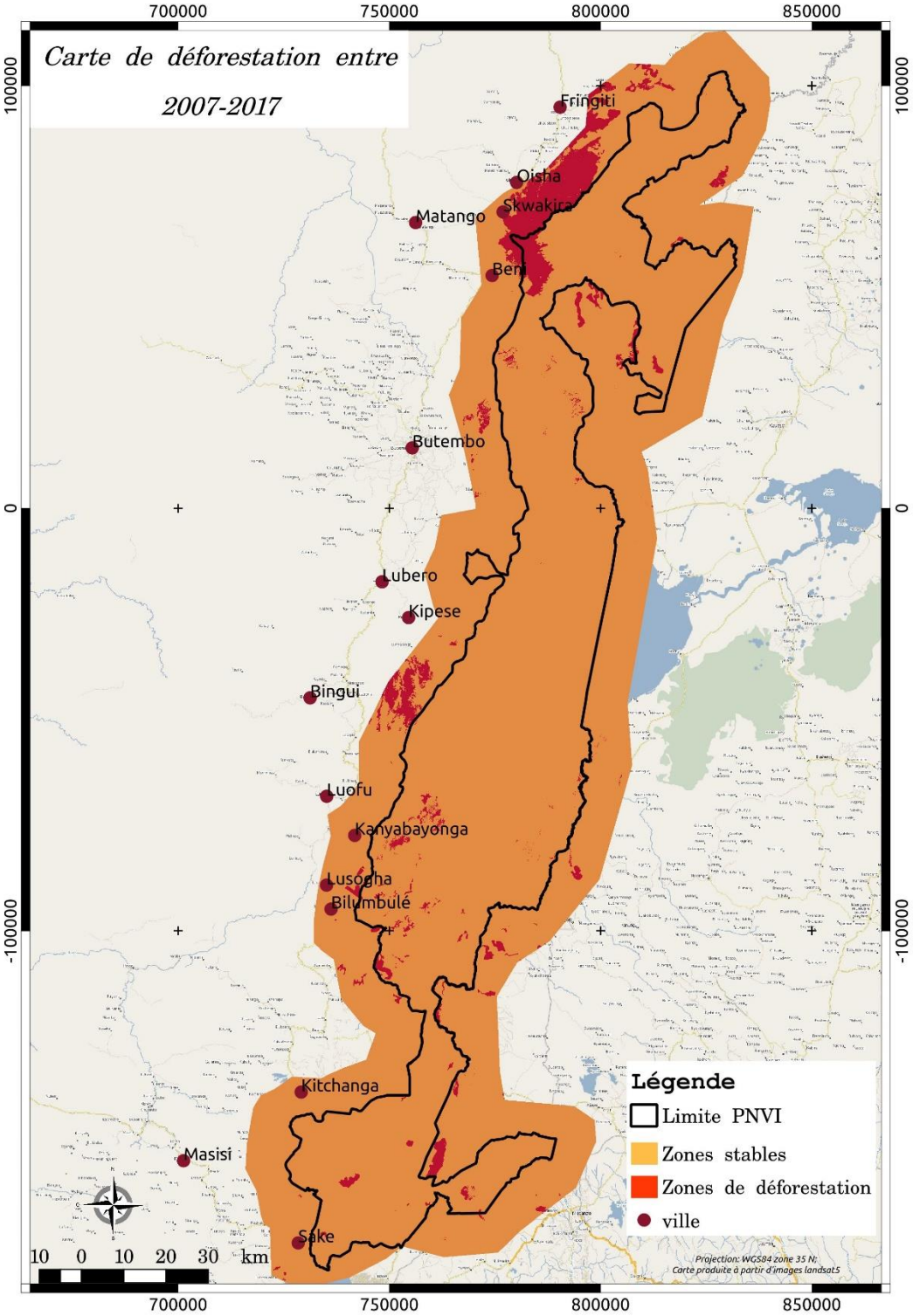


Figure 69:Carte de déforestation du paysage des Virunga entre 2007-2017

III.4. Déforestation en 1987-2017

La figure 70 illustre la spatialisation de la déforestation sur la période de 30 ans de 1987 à 2017. Sur cette période de 30 ans, au total, 268811 ha ont été déforestés.

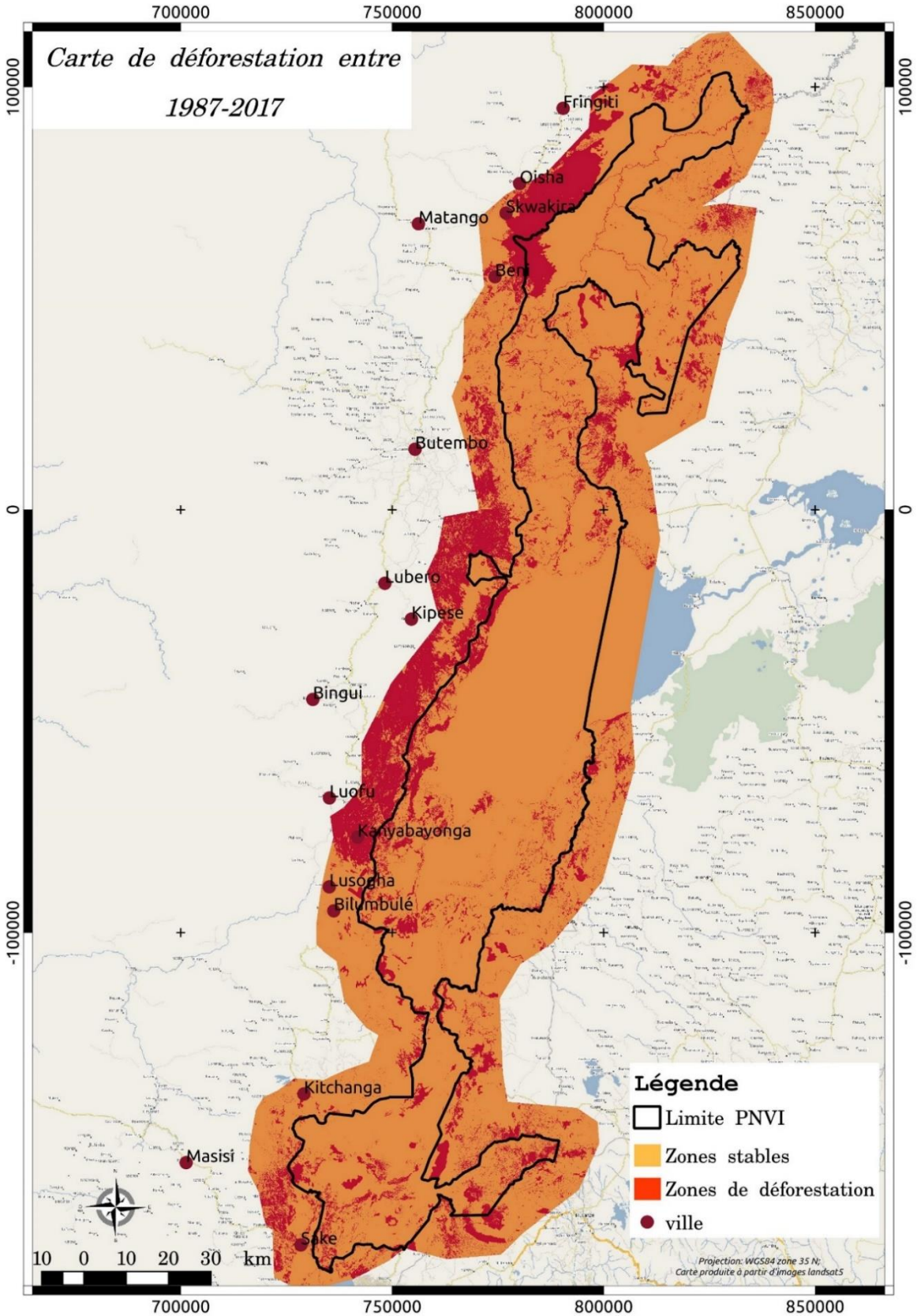


Figure 70:Carte de déforestation du paysage des Virunga entre 1987-2017

IV. Discussion des résultats

Sur la période de 1987 à 1997, nous avons constaté que les zones de déforestation sont réparties sur l'ensemble du paysage de Virunga. On observe une intensité forte de déforestation autour des villages et villes du nord du paysage des Virunga notamment la ville de Beni, et la localité du sud de Saké, Goma. Entre 1987 et 1997 il y a eu plusieurs conflits armés dans la sous-région. On peut citer :

- La guerre civile rwandaise entre 1990 et 1993 avec le génocide en 1994 ;
- La première guerre du Congo entre 1996 et 1997.

Ces conflits ont été à l'origine du déplacement de milliers de personnes, qui ont trouvé refuge dans la forêt et dans les localités de la RDC situées au sud du paysage de Virunga comme les villes de Saké et Goma. Ceci pourrait expliquer la forme de déforestation observé notamment autour des localités. De plus les zones de déforestation sont constituées de petites surfaces en moyenne de 1 ha. Il s'agit de déforestation due essentiellement à des prélèvements de bois pour des constructions ou pour la consommation énergétique (bois de feu et le charbon de bois). Ainsi les zones de forêts denses ou de forêts claires sont converties en zone ayant l'aspect de savanes (savanes arborées et savanes herbeuses). Cela pourrait expliquer l'augmentation de la surface des savanes arborées et savanes herbeuses entre 1987 et 1997 respectivement de 152552 ha (9,4% de la surface totale) en 1987 à 173811 ha (10,8% de la surface totale) en 1997 pour la savane arborée et de 144412 ha (8,9% de la surface totale) en 1987 à 276711 ha (17,1% de la surface totale) en 1997 pour la savane herbeuse.

Le rythme de la déforestation dans le paysage des Virunga a presque triplé dans la période de 1997-2007 et la période de 1987-1997, avec une surface de déforestation qui est passée d'un total de 44657 ha entre 1987-1997 à 154764 ha sur la période de 1997 à 2007. Sur cette période, on constate que les zones de déforestation sont situées dans la zone centrale du paysage des Virunga. Il s'agit de la zone très densément peuplée avec les localités de Butinbo, de Lubero, de Kimpesé, de Luoru, de Kanyabayonga et de Bingui. Il s'agit des localités rurales densément peuplées dont l'activité économique est basée sur l'agriculture et la consommation énergétique est basée sur le charbon de bois. Sur cette période de 1997 à 2007 la RDC a connu une guerre civile appelée la deuxième guerre du Congo et la guerre de Kivu. En effet, La deuxième guerre du Congo est un conflit armé qui eut lieu au sein du territoire de la RDC et qui débuta en 1998 et se termina officiellement en 2002. Ce conflit a entrainé des millions de déplacés particulièrement dans la région du nord Kivu où a débuté la rébellion qui a renversé le pouvoir de Kinshasa. En plus d'être dégradées pendant les combats, les ressources naturelles du PNVi ont été exploitées et mise à contribution comme effort de guerre. L'explosion de la déforestation sur cette période pourrait donc être expliquée par deux phénomènes :

- L'exploitation des ressources forestières par les anciens déplacés de guerres de la période de 1987 – 1997 et les nouveaux déplacées de guerres de la période de 1997 – 2007 ;
- L'exploitation abusive et illégale des ressources naturelles surtout forestières autour et dans le parc pour constituer les efforts de guerre pendant la deuxième guerre du Congo.

Entre 2007 et 2017 le rythme de déforestation s'est réduit par rapport à la période de 1997-2007 (1,82 pour la période 1997-2007 et 0,93% pour la période de 2007-2017). La zone de déforestation sur cette période se situe essentiellement dans la partie nord du paysage des Virunga autour des localités d'Oisha, de Skwakira de Fringiti. Depuis 2004 des conflits ont éclaté dans cette localité (nord du paysage des Virunga). D'après les informations obtenues auprès des sources du gouvernemental de la RDC et des Nations Unies, des rebellions ont éclaté dans cette localité et il y a d'importants déplacements de populations vers les zones de forêt provoquant la destruction progressive des forêts qui passent en savanes (savanes arborées et savanes herbeuses). Sur l'ensemble du paysage des Virunga entre 1987 à 2017 (sur 30 ans), plus de 268811 ha ont été perturbés par des activités anthropiques notamment les conflits armés, les activités agricoles et pour satisfaire les besoins en consommation énergétique.

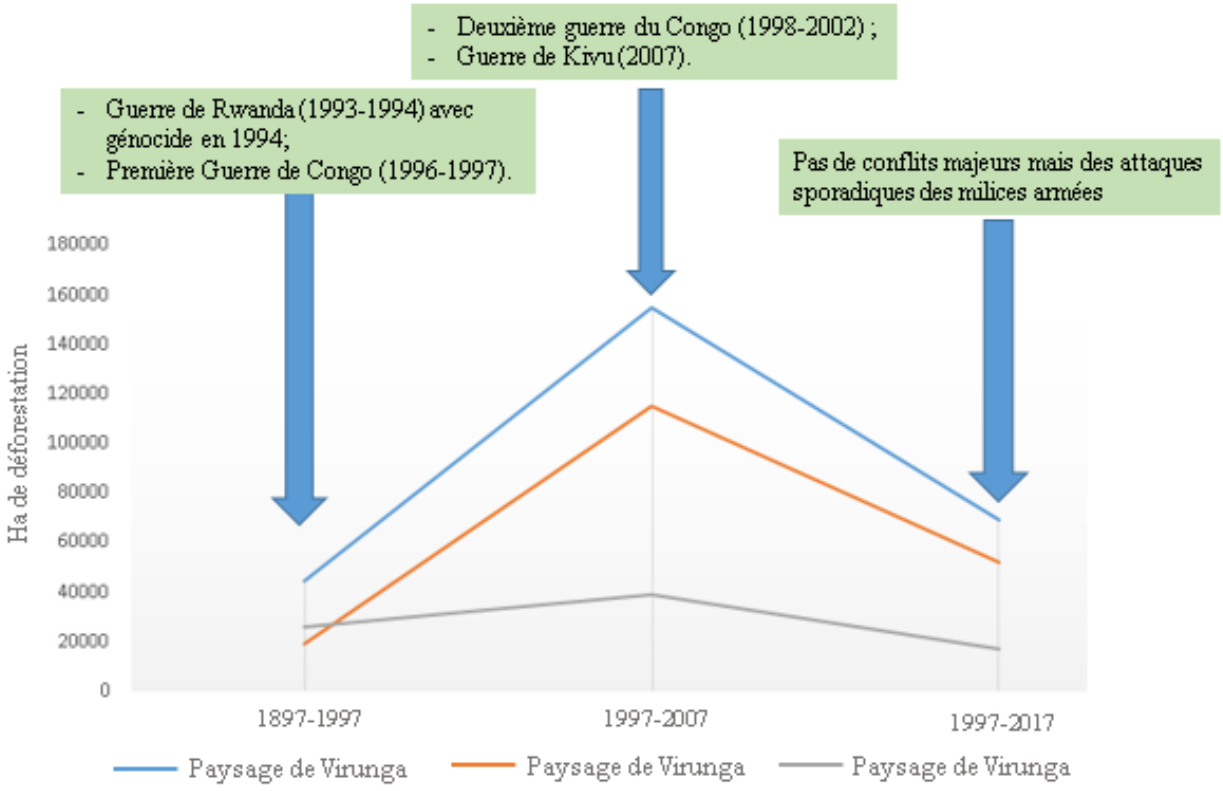


Figure 71: Déforestation et période des grands conflits dans le paysage des Virunga

Sur ces périodes, nous avons calculé le taux de déforestation annuel. En effet, le taux de déforestation annuel résulte du rapport entre la surface défrichée sur une période, divisée par la

surface forestière initiale et par le nombre d'années de la période (Menon et al, 1997, Ramesh et al, 1997, Narendra Prasad et al, 1998). Cependant, plusieurs publications ont récemment mis en lumière que l'évolution de la perte forestière ne peut pas être obtenue avec ce simple rapport (Puyravaud et al, 2002). La formule standardisée proposée par Puyravaud et al, (2002) a été adoptée dans cette étude pour calculer le taux de déforestation annuel.

$$\theta = -\frac{1}{t_2 - t_1} \ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right) * 100$$

avec:

- A_1= Surface forestière de l'année initiale ;
- A_2 = Surface forestière de l'année finale ;
- t_1 = date d'acquisition des images pour l'année initiale ;
- t_2 = date d'acquisition des images pour l'année finale.

Le tableau 22 présente les résultats du calcul du taux de déforestation sur la période 1987-1997 ; 1997-2007 ; 2007- 2017.

Tableau 22: Taux de déforestation annuel suivant les périodes.

Couverture forestière (ha)				
Année	1987	1997	2007	2017
Surface (ha)	973873	929216	774452	705062
Perte de couverture forestière (ha)				
Période	1987-1997	1997-2007	2007-2017	1987-2017
Surface (ha)	44657	154764	69390	268811
Taux de pertes (%)				
Période	1987-1997	1997-2007	2007-2017	1987-2017
Taux (%)	0,46	1,82	0,93	1,07

En utilisant la méthode de Puyravaud et al (Puyravaud et al, 2002), nous avons calculé le taux annuel de déforestation sur les périodes de 1987-1997, 1997-2007, 2007-2017. Le taux annuel de déforestation sur la période 1987-1997 est de 0,46%, ce taux dépasse celui de la moyenne au niveau national qui est de 0,34% sur la même période et obtenu avec la même méthode de calcul (MECNT, 2000). Ce taux annuel de déforestation est passé à 1,82% entre la période de 1997-2007 (Figure 68), suite à un rythme élevé de déforestation sur cette période. Sur la période de 2007-2017 ce taux annuel est retombé à 0,93%. Ce ralentissement du rythme de la déforestation sur cette période est probablement dû aux efforts de reconstitution du couvert ligneux dans la région à travers les différents projets engagés autours du parc national des Virunga.

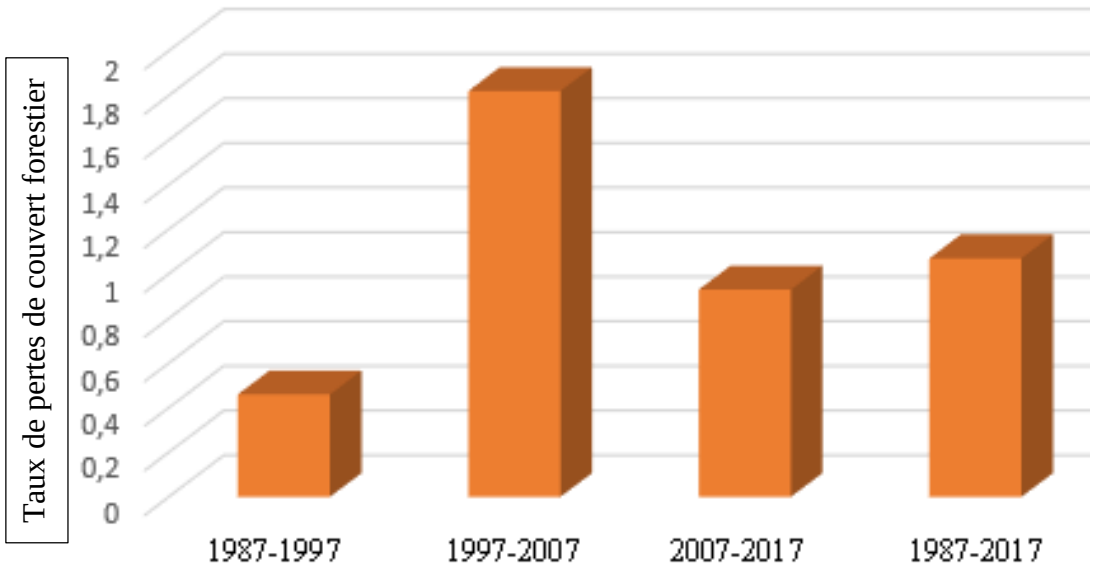


Figure 72: Taux de pertes du couvert forestier suivant les périodes

Sur la période de 30 ans entre 1987 et 2017, le taux moyen annuel de déforestation est de 1,07%. Ce taux moyen annuel est en légère augmentation par rapport au taux moyen annuel de déforestation au niveau national qui est de 0,9 % sur la même période (FAO, 2017). Cela montre la pression croissante sur les ressources forestières dans le paysage des Virunga. Cette pression est en partie et sans doute due aux différents déplacements, à la réinstallation et à la sédentarisation des populations déplacées durant les différents conflits.

Le tableau 23 présente l'analyse de la déforestation sur les différentes périodes à l'intérieur et hors de PNVi

Tableau 23: Analyse de la déforestation à l'intérieur et hors du parc de PNVi

Evolution de la déforestation entre 1987 et 2017 dans et hors PNVi															
1987-1997				1997-2007				2007-2017				1987-2017			
Total (ha)	PNVI	hors PNVi	PNVi (%)	Total (ha)	PNVI	hors PNVi	PNVi (%)	Total (ha)	PNVI	hors PNVi	PNVi (%)	Total (ha)	PNVI	hors PNVi	PNVi (%)
44657	25831	18826	57,8	154764	39322	115442	25,4	69390	17149	52241	24,7	268811	82302	186509	30,6

La déforestation à l'intérieur du PNVi sur la période 1987-1997 est de 25830 ha elle représente plus de 57% de la déforestation du paysage des Virunga (44657 ha).

Sur la période de 1997-2007 la surface de déforestation a triplée (154800 ha) par rapport à la période de 1997-2007 sur le paysage de la Virunga. Dans le PNVi il y a eu sur cette période 39300 ha de déforestation. Cela représente 25% de la surface totale de déforestation sur la période. Bien qu'il y ait une augmentation de la déforestation, on note que l'intensité à l'intérieur du PNVi est considérablement réduite.

Sur la période de 2007- 2017 la surface de la déforestation au niveau du paysage de Virunga s'est considérablement réduite (69 400 ha). Au niveau du PNVi 1715 ha de forêts ont été transformés en non forêt. Cela représente 30% de tous les changements dans le paysage de PNVi.

Sur l'ensemble de la période de 1897-2017 la déforestation à l'intérieur du PNVi représente 30% de l'ensemble de la déforestation dans le paysage du PNVI soit un totale de 82300 ha de surfaces de déforestation.

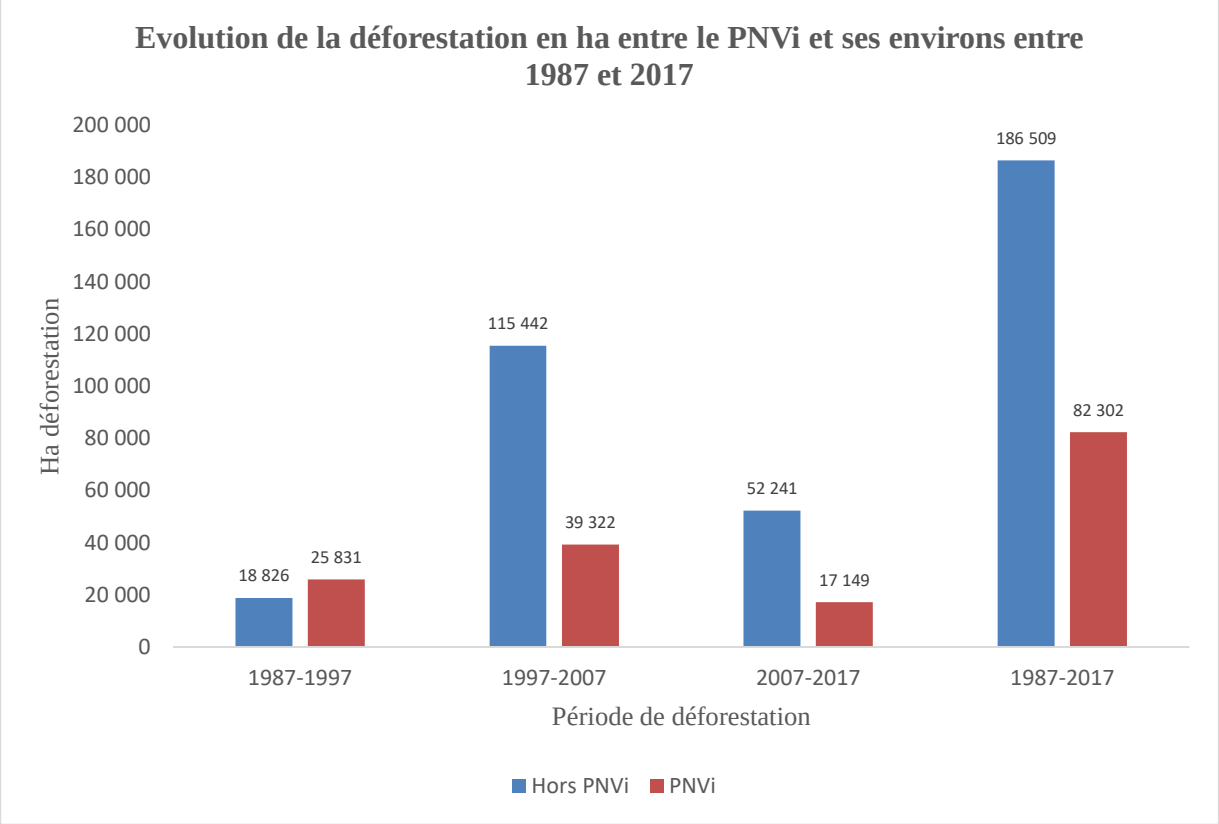


Figure 73: Evolution de la déforestation en ha à l'interieur et à l'exterieur du PNVi

Partie II

Chapitre V : Évaluation des ressources forestières des aires protégées du Togo : Cas de la réserve de biosphère d'Oti – Keran – Mandourie (OKM) et de la réserve de faune de Togodo (RFT).

Sommaire

Introduction
I. Définition des classes d'occupation des sols
II. La réserve de biosphère de l'Oti-Keran-Mandourie (OKM)
II.1 Production de la carte d'occupation des sols de 2017
II.1.1 Cartes en saison sèche
II.1.2 Cartes en saison des pluies
II.1.3 Carte finale et statistiques des classes d'occupation du sol
II.2 Résultat de l'estimation de carbone dans la réserve
II.2.1. Résultat de l'inventaire forestier
III. La réserve de faune de Togodo (RFT)
III.1 Production de la carte d'occupation des sols de 2017
III.1.1 Cartes en saison sèche
III.1.2 Cartes en saison des pluies
III.1.3 Carte finale et statistiques des classes d'occupation du sol
III.2 Résultat des inventaires forestiers
III.2.1. Résultat de l'inventaire forestier

IV. Conclusion

Introduction

Cette partie est consacrée à la présentation des résultats de l'évaluation des ressources forestières des galeries et reliques forestières des aires protégées du Togo. La réserve de faune de Togodo située dans le Sud du Togo et la réserve de Biosphère de l'Oti-Keran-Mandourie située dans le Nord du Togo sont choisies comme sites tests pour cette application. Les variations saisonnières sont prises en considération dans le mode de traitement des images.

L'évaluation de la capacité de séquestration de carbone demande :

- d'évaluer la surface des zones forestières des aires protégées à partir de l'analyse d'images satellitaires et d'effectuer la cartographie de l'occupation du sol ;
- d'évaluer les ressources forestières en s'appuyant sur l'inventaire forestier.

Pour l'évaluation des surfaces des ressources forestières, nous présenterons les résultats des différents tests d'extraction automatique des classes d'occupation du sol réalisées à partir des images satellitaires.

- sur le site de l'OKM, à partir d'images optique Sentinel-2 multispectrales, d'images radar Sentinel-1 en bande C (polarisations VV et VH), et de la fusion des images Sentinel-1 et Sentinel-2 ;
- sur le site de RFT, à partir des images radar Sentinel-1 en bande C (polarisations VV et VH), images radar Alos-2 en bande L (polarisations HH et HV) et de la fusion des images Sentinel-1 et Alos-2.

A la suite de tous les tests une carte finale d'occupation des sols est produite pour chaque aire protégée en considérant la classification la plus discriminante.

Pour l'estimation des ressources forestières, nous présenterons les résultats de l'inventaire forestier réalisé dans chaque aire protégée en faisant ressortir les paramètres dendrométriques caractérisants les forêts.

I. Définition des classes occupation des sols

Sur les images satellitaires 9 classes et strates d'occupation du sol sont identifiées et numérisées pour constituer des sites d'entrainement pour la classification. Le tableau 24 présente les classes d'occupation du sol et leurs définitions. Ces classes correspondent aux strates d'occupation du sol retenues par le ministère de l'environnement et des ressources forestières au Togo pour la réalisation des cartes d'occupation du sol dans le cadre des processus REDD+.

Tableau 24:définition des classes d'occupation des sols identifiées au Togo

CLASSES D'OCCUPATION DU SOL	DEFINITIONS
Forêts denses sèches	Peuplement fermé avec des arbres et des arbustes atteignant diverses hauteurs mais généralement de taille moins élevée que les forêts denses semi-décidues et décidues ; la plupart des arbres des étages supérieurs perdent leurs feuilles une partie de l'année ; le sous-bois est formé d'arbustes soit semi-décidus ; soit décidus et sur le sol se trouvent çà et là des touffes de graminées.
Forêts riveraines	Forêts longeant les cours d'eau de largeur généralement étroite.
Plantations	Peuplements forestiers établis par plantation et/ou semis dans un processus de boisement ou de reboisement. Elles se composent soit d'espèces introduites, soit des peuplements d'espèces indigènes soumis à un aménagement intensif.
Formations marécageuses	Peuplement forestier sur sol gorgé d'eau en permanence ; Parfois ces forêts marécageuses sont constituées presque uniquement de raphias
Savane arborée	Variante de savane dans laquelle arbres et arbustes sont disséminés parmi les tapis graminéens, avec une légère dominance d'arbres atteignant les dimensions d'arbres (des hauteurs > supérieure à 5 m).
Savanes herbeuses	Variante de savane dans laquelle les arbres et les arbustes sont absents du tapis graminéen
Sols nus, roches, carrières et plages	Il s'agit de zones sans végétation, de zones rocheuses ou de carrières d'exploitation minière.
Agglomérations et infrastructures	Ensemble des zones de constructions artificielles, d'habitation, de route et d'installation urbaine ou rurale.
Plans d'eau et rivières	Il s'agit des zones de rivières, de lacs, de retenue d'eau.

Les classes ainsi définies ont été identifiées sur les différentes images satellitaires par photo-interprétation. Des régions d'intérêt ont été sélectionnées par la suite pour créer le modèle nécessaire pour la réalisation des classifications. Pour rappel, l'algorithme de classification utilisé est l'algorithme SVM.

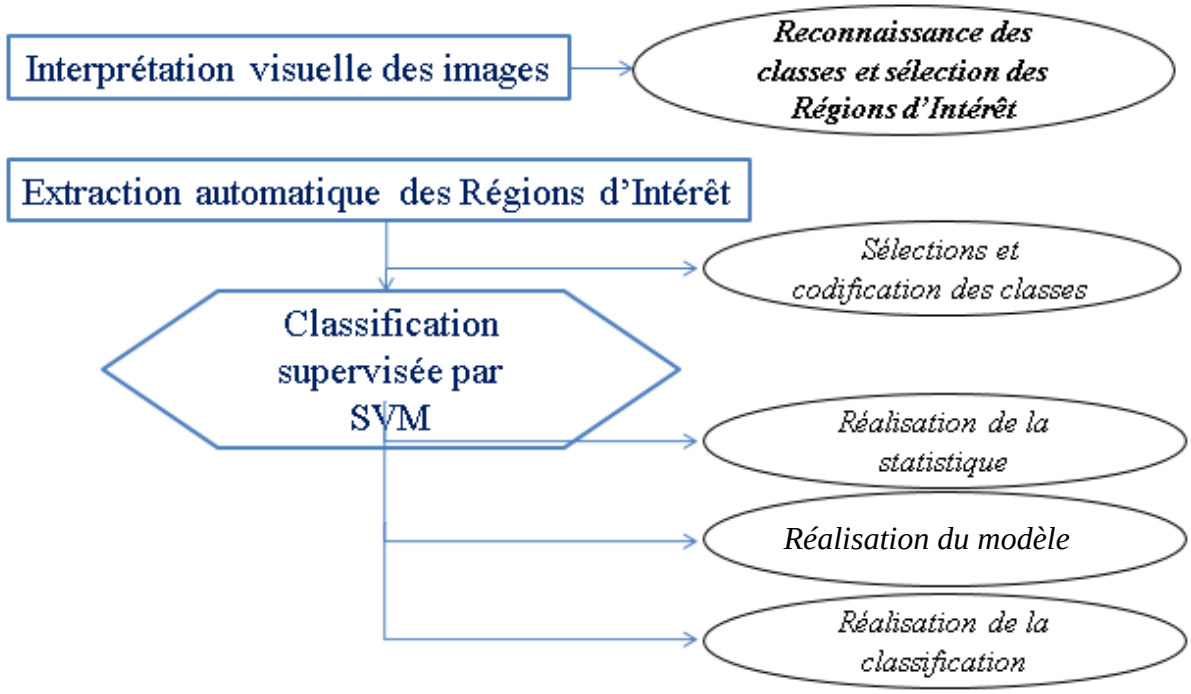


Figure 74: Etape de la réalisation des classifications

Nous avons produit pour chaque classe le profil temporel sur les mesures des polarisations VV et VH en décibel des images Sentinel-1. Ce profil temporel permet de se rendre compte de la séparabilité entre les différentes classes d'occupation du sol.

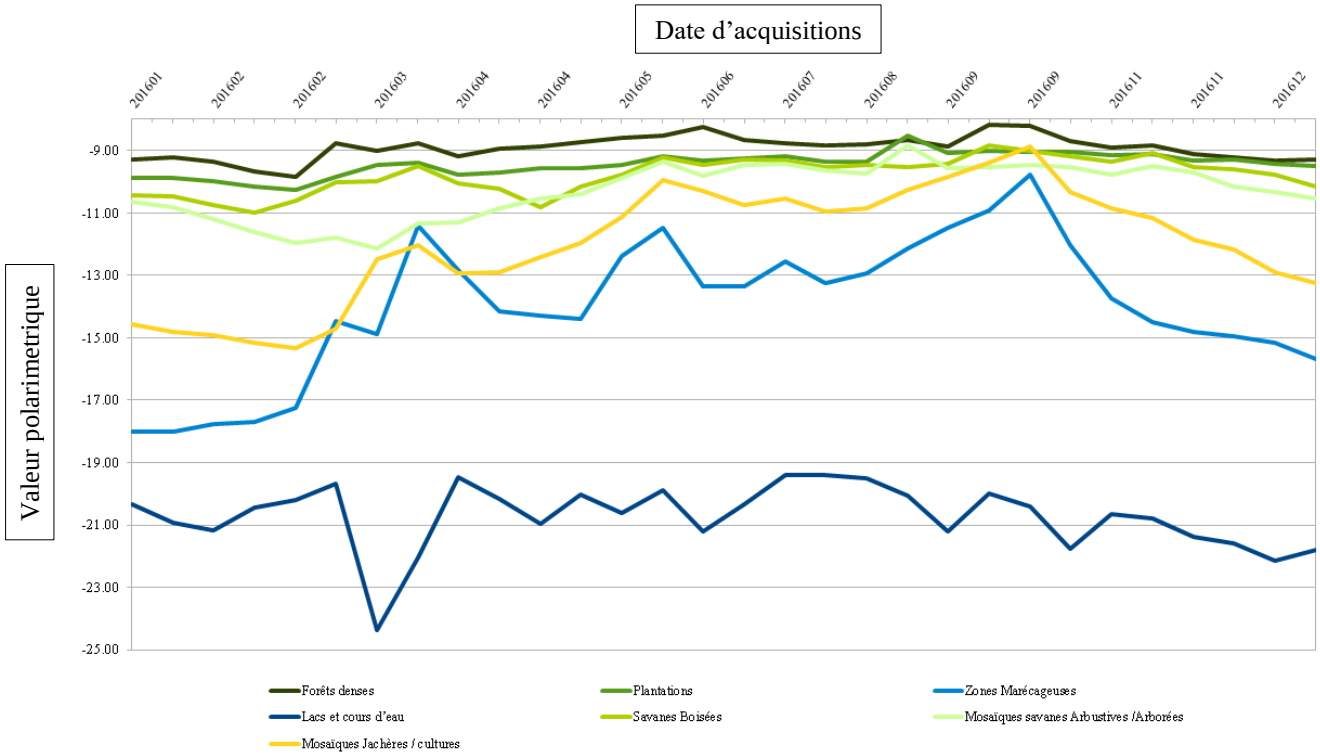


Figure 75: Profil temporel des classes d'occupation du sol sur la polarisation VV en décibel des images Sentinel-1

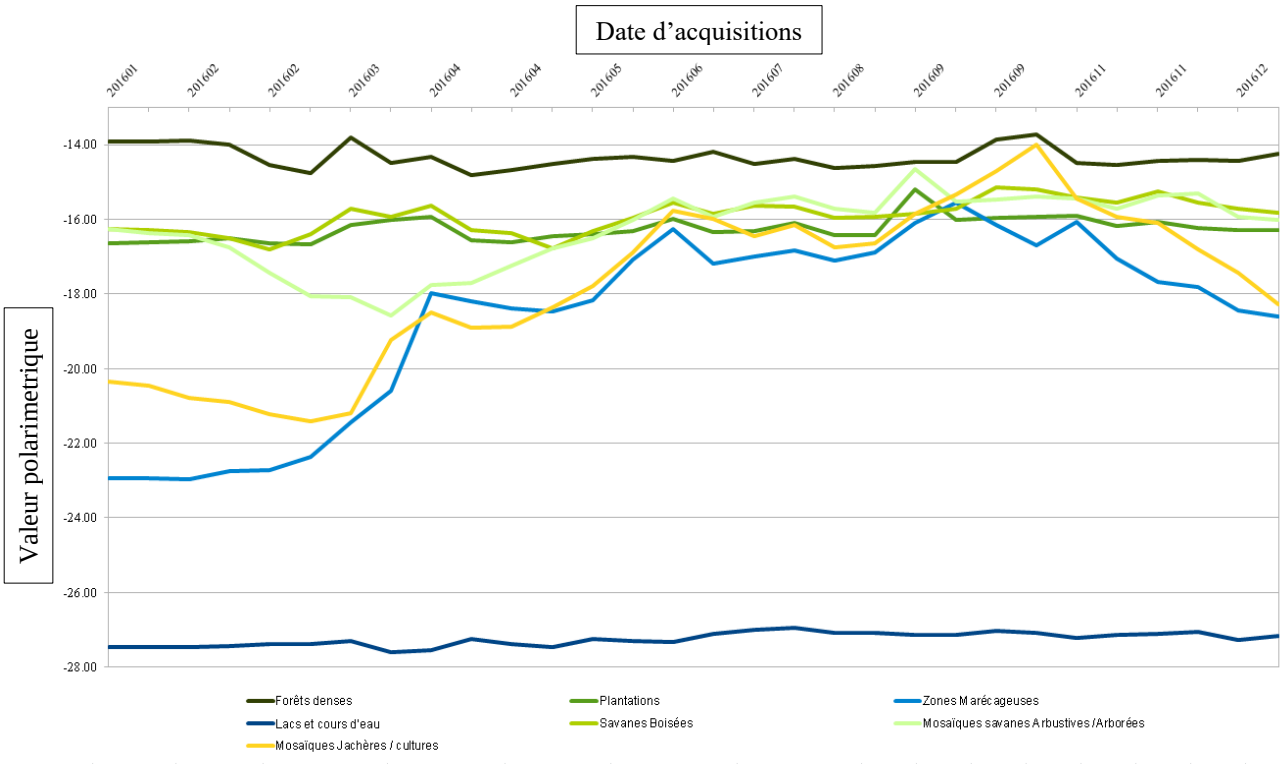
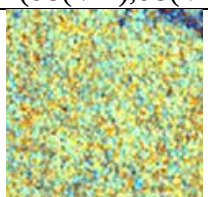
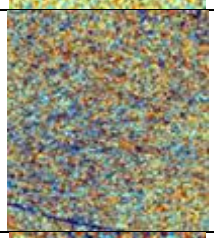
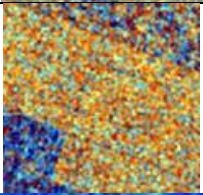
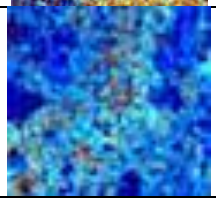
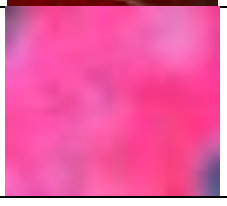
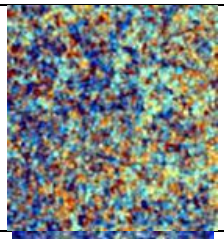
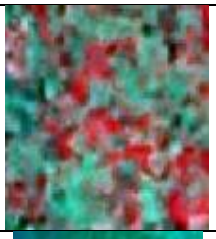
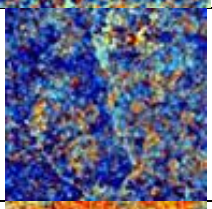
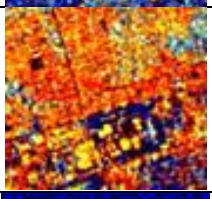
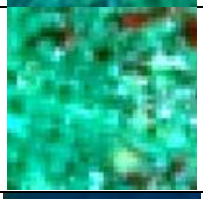
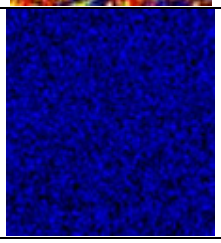


Figure 76:Profil temporel des classes d'occupation du sol sur la polarisation VH en décibel des images Sentinel-1

Tableau 25: Illustration des classes d'occupation du sol sur les images Sentinel-1 et Sentinel-2 rendant compte de leur séparabilité visuelle.

Classes thématiques	Echantillons d'entrainement sur Sentinel-1(**Canal R**= db(VV) ; **Canal V** = db(VH) ; **Canal B=** diff(db(VH),db(VV)	Echantillons d'entrainement sur Sentinel-2(**Canal R**= bande 8 ; **Canal V** = bande 11 ; **Canal B=** Bande 2
Forêt dense		
Forêt riveraines		
Plantation		
Formations marécageuses		

Mosaïques savanes arborées / savanes arbustives		
Mosaïques savanes herbeuses / Jachères / Cultures		
Agglomérations et infrastructures		
Lacs et cours d'eau		

II. La réserve de biosphère de l'Oti-Keran-Mandourie (OKM)

II.1 Production de carte d'occupation des sols de 2017

Nous allons présenter les résultats des analyses réalisées sur les images Sentinel-2 et Sentinel-1 pour la saison sèche et la saison pluvieuse 2017. Les analyses réalisées sont des classifications supervisées avec l'algotrithme Random Forest.

II.1.1 Cartes en saison sèche

- *Analyse d'images Sentinel-2*

Les résultats de la classification sur l'image Sentinel-2 montrent que la précision « producteur » moyenne est de près de 94 %. On remarque qu'à l'exception de la classe ''sols nus'', toutes les autres classes ont des précisions producteur supérieures à 90%. Les précisions « utilisateur » sont aussi supérieures à 90% à l'exception de la classe ''zones agricoles'' ou la précision utilisateur est de 68%. Les classes ''forêts denses'' sont particulièrement bien discriminées avec des précisions producteurs et utilisateurs respectivement de 99% et 98%. Pour la classe ''sols nus'' la précision producteur est de 74,7%. On remarque que cette classe se confond avec la classe ''zones agricoles''. Lors de nos missions de terrain, nous avons remarqué qu'en saison sèche, les terrains agricoles sont dénudés de cultures et s'apparentent alors à des zones de sols nus. Cela explique la faible (68%) précision utilisateur obtenue sur les classes de zones agricoles.

La classe cours d'eau est particulièrement bien discriminée avec 100% pour les précisions utilisateur et producteur. La classe ''marécage'' n'a pas été discriminée sur les images, cela peut-être probablement due à l'asséchement des zones marécageuses pendant la saison sèche. En effet, la durée de la saison sèche est longue et les températures en journée pendant cette saison peuvent atteindre 40°C, ce qui provoque une forte évaporation.

Tableau 26: Matrice de confusion de la classification des images Sentinel-2 sur le site de l'OKM en saison sèche en pixels

	Forêts denses	Forêts riveraines	Savanes arborées	savanes herbeuses	Sols Nus	Zones Agricoles	Cours d'eau	Total	Précision utilisateur (%)
Forêts denses	**1008**	17	0	0	0	0	0	1025	**98,3**
Forêts riveraines	4	**292**	9	1	0	0	0	306	**95,4**
Savanes arborées	0	5	**954**	2	3	0	0	964	**98,9**
Savanes herbeuses	0	5	14	**942**	0	11	0	967	**97,4**
Sols nus	0	0	4	0	**363**	0	0	367	**98,9**
Zones Agricoles	0	1	13	31	120	**348**	0	513	**67,8**
Cours d'eau	0	0	0	0	0	0	**984**	984	**100**
Total	1012	315	994	976	486	359	984		
Précision Producteur %	**99,6**	**92,7**	**95,9**	**96,5**	**74,7**	**96,9**	**100**		
Précision Moyenne %	**93,7**								

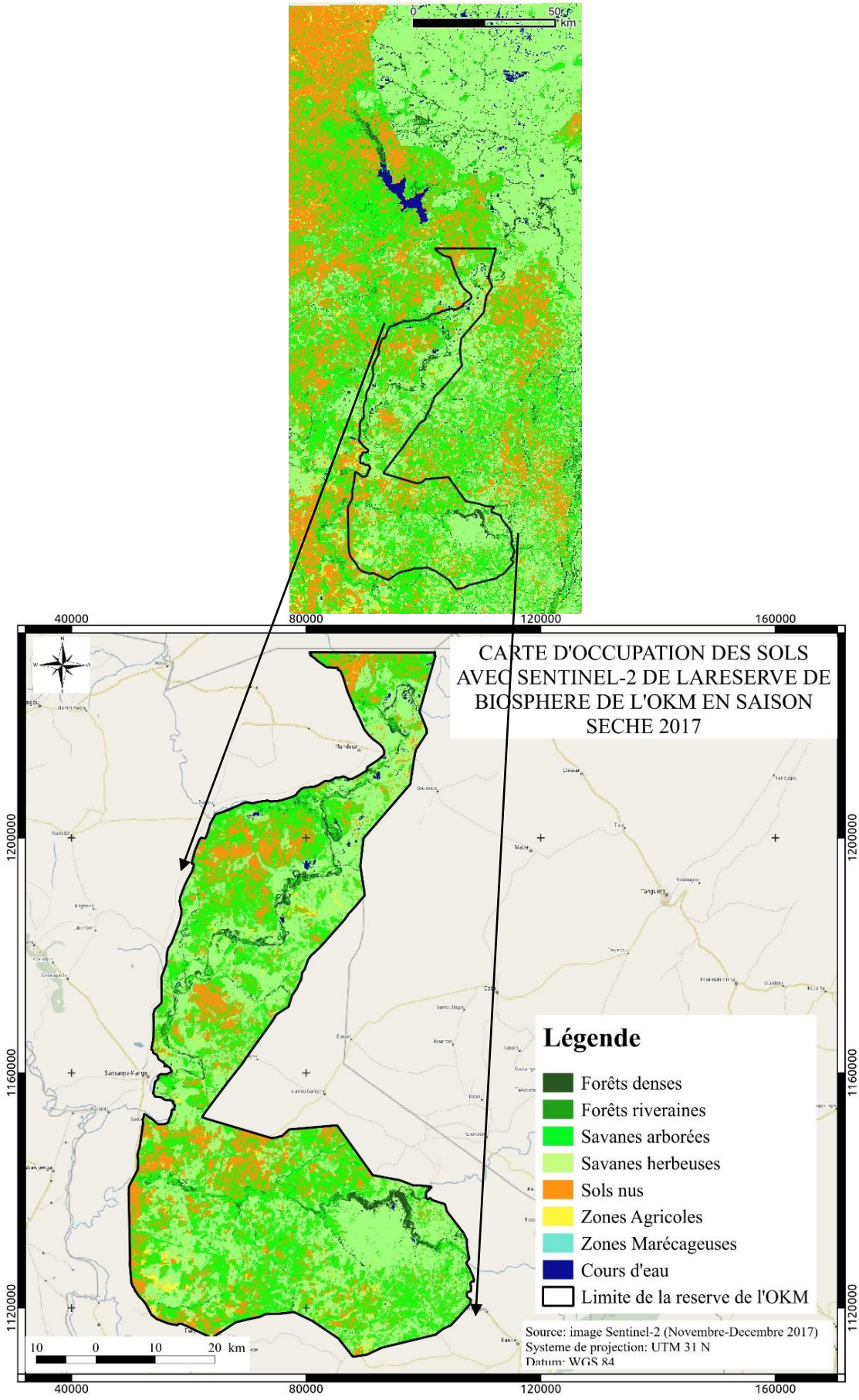


Figure 77:Carte d'occupation des sols de la réserve de l'OKM en saison sèche (Classification des images Sentinel-2).

- *Analyse des séries d'images Sentinel-1*

Les résultats de la classification sur la série d'images Sentinel-1 acquises en saison sèche entre novembre - avril 2017 permettent de discriminer les classes d'occupation définies précédemment. Les résultats montrent que la précision moyenne est de 90,9%. En dehors de la classe ‘‘forêts riveraines’’ qui a une précision producteur de 60%, les autres classes ont des précisions producteur superieur à 90%. La classe ‘‘forêts riveraines’’ moins dense que la classe ‘‘forêts denses’’ présente une confusion assez importante avec la classe ‘‘savanes arborées’’. Ces ‘‘forêts riveraines ’’ sont composées essentiellement d'espèces décidues qui perdent leurs feuilles en saison sèche et sans feuilles les arbres peuvent avoir signature comparble à celle des espèces en savnes.Cette situation pouvait expliquer la confusion entre les deux classes ‘‘forêts riveraines’’ et ‘‘savanes arborées’’. Ainsi le capteur Sentinel-1 en bande C avec les polarisations VV, VH enregistre de façon identique ces deux écosystèmes pourtant bien distincts du point de vue structurel et écologique. La confusion de ces deux classes explique alors les valeurs moins élevées des précisions utilisateurs obtenues pour ces deux classes (85% pour la classe ‘‘forêts riveraines’’ et 76% pour la classe ‘‘savanes arborées’’). Dans cette classification contrairement à la classification de l'image Sentinel-2, on n'observe pas de confusion entre les classes ‘‘sol nu’’ et ‘‘zone agricoles’’, ces deux classes ont respectivement des précisions producteurs de 99% et 95%. De même des précisions utilisateurs de 95% et 96%. Cela peut s'expliquer par le fait que les zones agricoles présentent une surface végétale qui change la polarisation du signal radar (V en H par exemple) alors que sur les zones de ‘‘sols nus’’ les polarisations sont conservées à l'émission et à la réception. Ainsi par le changement de la polarisation à la réception, les ‘‘zones agricoles’’ et les ‘‘sols nus’’ se discriminent dans les images Sentinel-1 grâce à la polarisation VH, d'intensité plus élevée sur les zones agricoles.

Tableau 27: Matrice de confusion de la classification des images Sentinel-1 sur le site de l'OKM en saison sèche en pixels

	Forêts denses	Forêts riveraines	Savanes arborées	savanes herbeuses	Sols Nus	Zones Agricoles	Cours d'eau	Total	Précision utilisateur (%)
Forêts denses	**956**	6	0	0	0	6	0	966	98,9
Forêts riveraines	0	**361**	62	0	0	0	0	423	85,3
Savanes arborées	1	235	**796**	4	0	0	0	1040	76,5
Savanes herbeuses	0	5	1	**425**	0	11	4	435	97,7
Sols nus	0	0	0	0	**949**	49	2	1000	94,9
Zones Agricoles	0	0	0	38	0	**962**	0	1000	96,2
Cours d'eau	0	0	0	0	5	0	**994**	999	99,5
Total	957	607	859	467	958	1015	1000		
Précision Producteur %	**98,3**	**59,5**	**92,7**	**91**	**99,1**	**94,7**	**99,4**		
Précision Moyenne %	**90,9**								

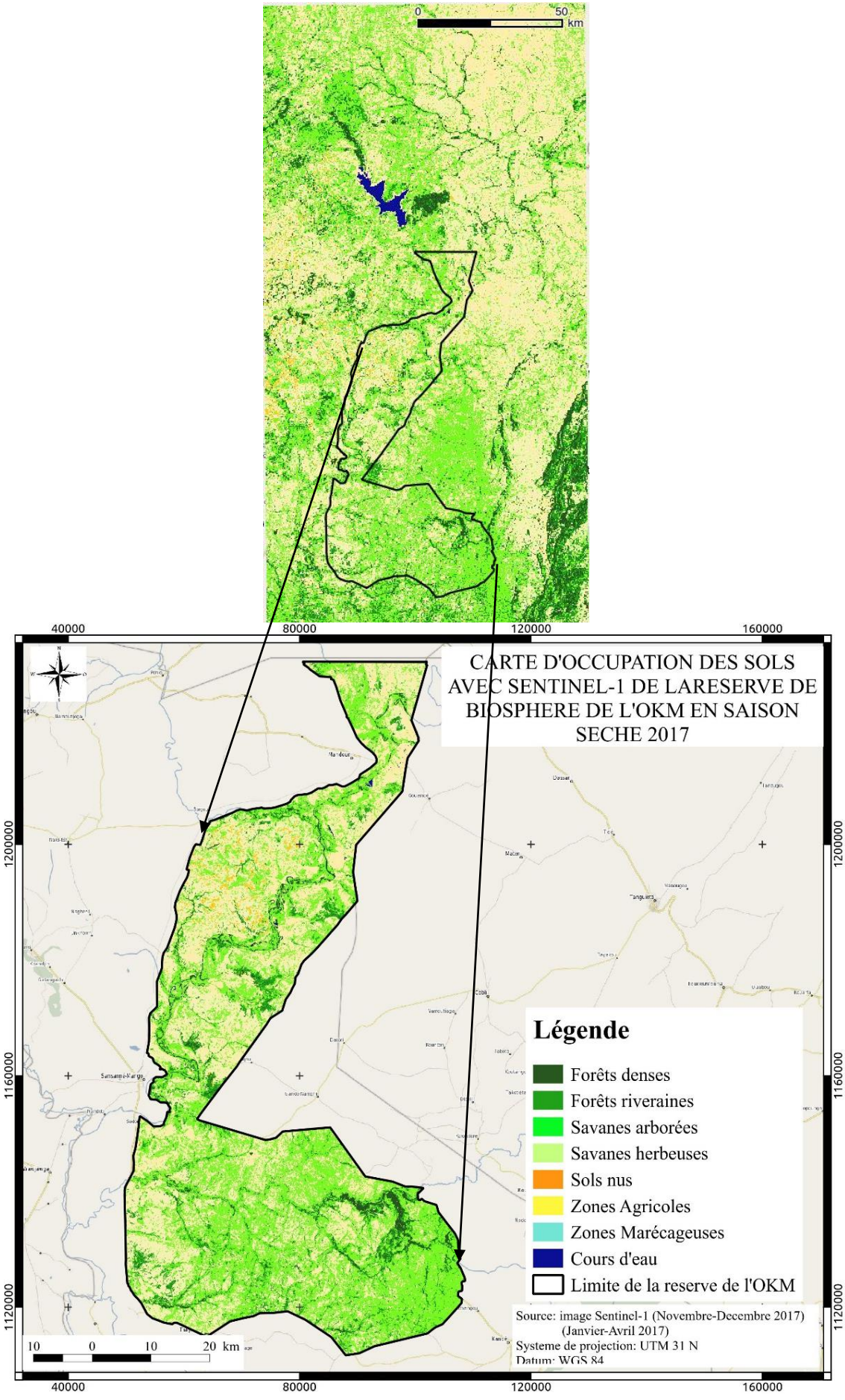


Figure 78: Carte d'occupation des sols de la réserve de l'OKM en saison sèche (par Classification des images Sentinel-1)

- *Analyse de la combinaison (fusion) des images Sentinel-1 et 2*

Les statistiques de la classification issue de la combinaison des images Sentinel-1 et Sentinel-2 sont de meilleure qualité que celles issues de la classification des deux images utilisées de façon séparée. La précision producteur moyenne est de 96,5% alors qu'elle n'est que de 90% pour la classification d'image Sentinel-1 et de 93% pour la classification de l'image Sentinel-2. Les confusions entre la classe ''forêts riveraines '' et ''savanes arborées'' sont notablement réduites. Dans cette classification, ces deux classes ont des précisions productrices respectives de 95% et 99%. Ainsi pour la classe ''forêts riveraines '' les informations spectrales apportées par les bandes d'images Sentinel-2 et les informations de polarisation apportées par Sentinel-1 ont permis de faire passer sa précision producteur à 95% au lieu de 60% pour les images Sentinel-1 seules et 92,7% pour les images Sentinel-2 seules. Les confusions entre ''sols nus'' et ''zones agricoles'' sont aussi atténuées en comparaison des confusions obtenues sur les classifications réalisées séparément des images Sentinel-1 et Sentinel-2. Les autres classes d'occupation du sol sont aussi bien discriminées avec des précisions producteurs au-delà de 90%. La bonne qualité des résultats de la classification se remarque aussi au niveau des précisions utilisateurs de toutes les classes d'occupation du sol. Ces précisions utilisateurs sont supérieures 90%.

Tableau 28: Matrice de confusion de la classification de la combinaison des images Sentinel-1 et sentinel-2 sur le site de l'OKM en saison sèche en pixels

	Forêts denses	Forêts riveraines	Savanes arborées	savanes herbeuses	Sols Nus	Zones Agricoles	Cours d'eau	Total	Précision utilisateur (%)
Forêts denses	**930**	43	0	0	0	6	0	973	95,6
forêts riveraines	103	**915**	0	0	1	0	0	1019	89,8
Savanes arborées	0	0	**1044**	0	0	0	0	1044	100
Savanes herbeuses	0	0	0	**953**	0	72	0	1025	92,9
Sols nus	0	1	0	0	**271**	1	0	273	99,3
Zones Agricoles	0	0	3	39	0	**539**	0	581	92,7
Cours d'eau	0	0	0	3	0	0	**992**	995	99,7
Total	1033	959	1047	995	272	612	992		
Précision Producteur %	**90,1**	**95,4**	**99,7**	**95,8**	**99,6**	**88,1**	**100**		
Précision Moyenne %	**96,5**								

L'ensemble des résultats précédents montre que la combinaison de Sentinel-1 (image radar en bande C avec polarisation VV, VH) et de Sentinel-2 (image optique avec des bandes spectrales de : 0,433 à 228 µm) permet d'obtenir des indices de précision de classification meilleurs et une discrimination plus précise des classes d'occupation du sol.

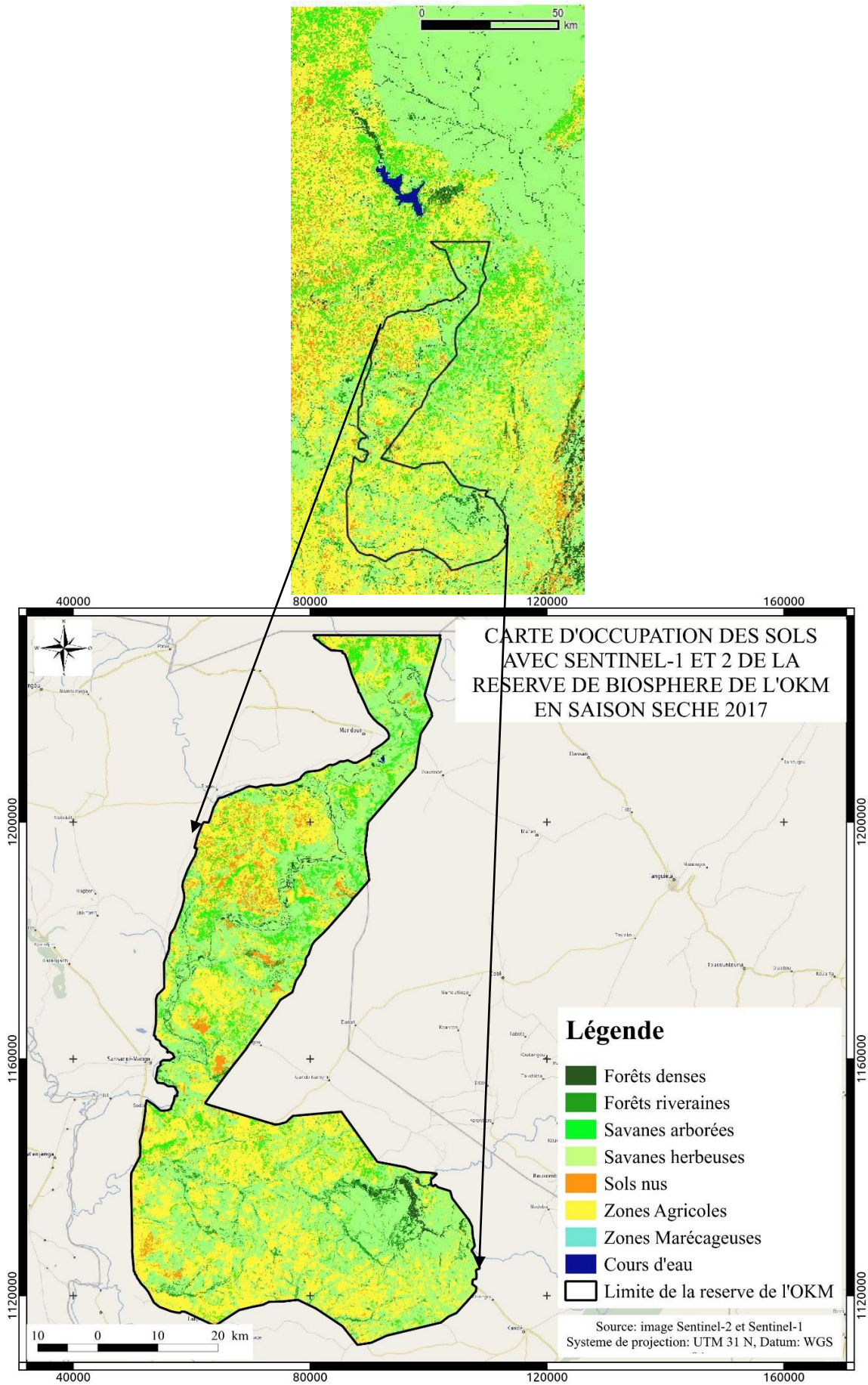


Figure 79:Carte d'occupation des sols de la réserve de l'OKM en saison sèche avec Sentinel-1 et Sentinel-2

II.1.2 Cartes en saison pluvieuse

- *Analyse d'image Sentinel-2*

La période des saisons pluvieuses dans le Nord du Togo dure 6 mois de mai à octobre. En 2017 sur cette période, les images Sentinel-2 disponibles sont toutes couvertes de nuages ou de voiles nuageux rendant ainsi impossible leur exploitation pour la réalisation de la cartographie. Ainsi sur cette période nous n'avons pas pu produire de carte d'occupation des sols avec les images Sentinel-2.

- *Analyse d'image Sentinel-1*

Cette classification, conduit à une précision productrice moyenne de 84%. Les classes ''forêts denses'' et ''cours d'eau'' ont des précisons producteurs et utilisateurs bien supérieures aux autres classes indiquant ainsi qu'elles sont faciles à discriminer.

Tableau 29:Matrice de confusion de la classification des images Sentinel-1 sur le site de l'OKM en saison pluvieuse en pixels

	Forêts denses	Forêts riveraines	Savanes arborées	savanes herbeuses	Sols Nus	Zones Agricoles	Zones Marécageuses	Cours d'eau	Total	Précision utilisateur (%)
Forêts denses	**995**	6	2	0	0	1	0	0	1004	99,1
Forêts riveraines	1	**264**	27	13	0	0	0	0	305	86,6
Savanes arborées	4	59	**561**	370	0	32	16	0	1042	53,8
Savanes herbeuses	0	7	144	**834**	0	0	0	0	985	84,7
Sols nus	0	0	0	7	**223**	0	0	6	236	94,5
Zones Agricoles	11	0	65	1	0	**813**	139	0	129	79
Zones Marécageuses	1	0	64	0	0	123	**848**	0	1036	81,9
Cours d'eau	0	0	0	1	21	0	0	**969**	991	97,7
Total	1012	336	863	1226	244	969	1003	975		
Précision Producteur %	**98,3**	**78,5**	**65**	**68**	**91,4**	**83,9**	**84,5**	**99,4**		
Précision Moyenne %	**83,6**									

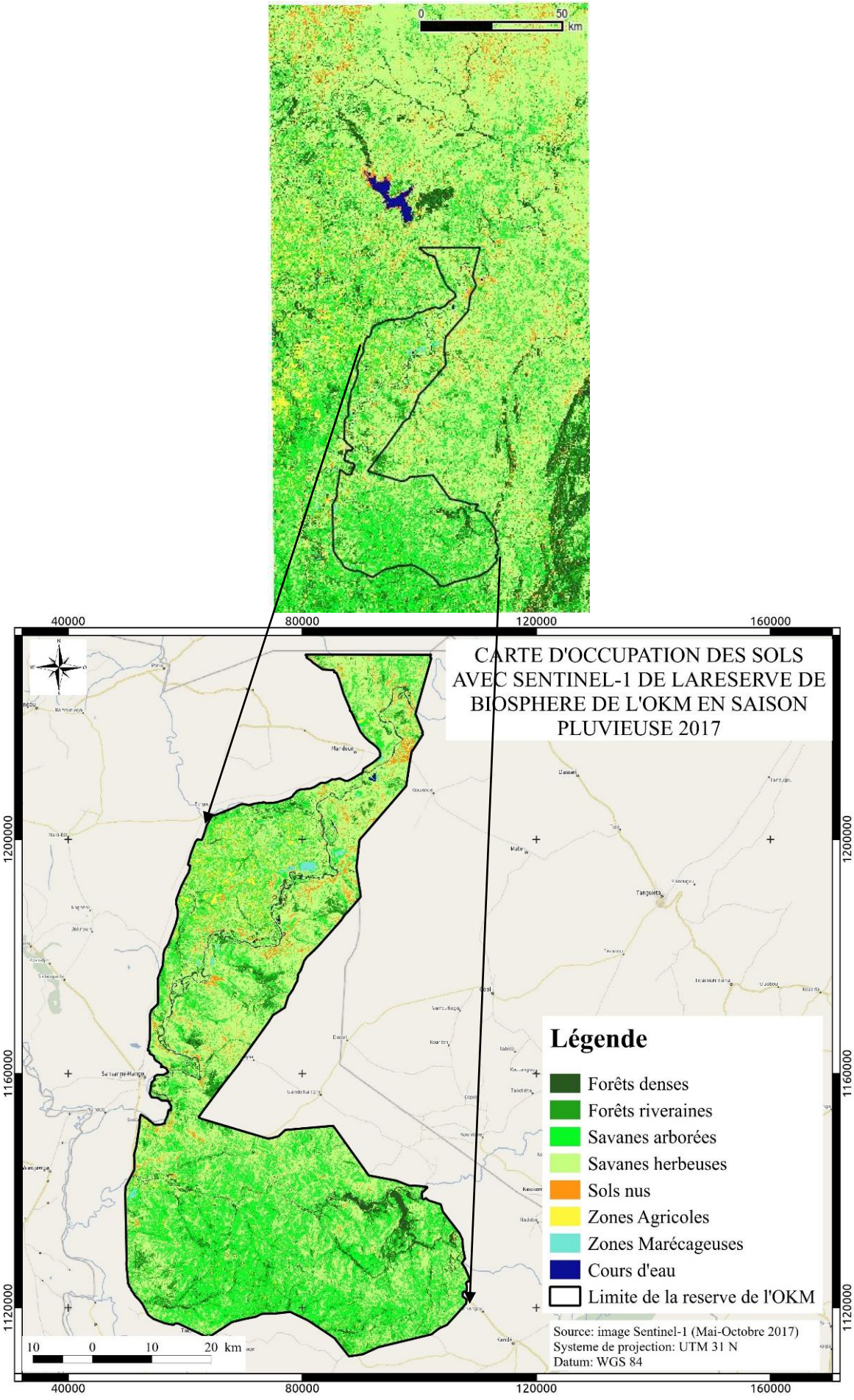


Figure 80: Carte d'occupation des sols de la réserve de l'OKM en saison pluvieuse

II.1.3 Carte synthétique des classes d'occupation du sol

La carte finale de la réserve de l'OKM est obtenue en combinant les différentes classifications de saisons sèches et pluvieuses en privilégiant les différentes classes de forêts (forêts denses, forêts riveraines) dans les différentes classifications dans un premier temps puis les zones de savanes arborées et herbeuses dans un deuxième temps et enfin les classes cours d'eau, zones marécageuses et sols nus. Ce choix de regroupement est réalisé afin de valoriser les zones de couvert végétal car l'estimation du stock de carbone se fera dans ces écosystèmes. L'ensemble des opérations est réalisé lors du post-traitement et le tableau 30 présente les opérations de géo-traitement réalisées. La figure 81 présente le résultat final de la carte d'occupation du sol de la réserve de biosphère de l'OKM et le tableau 31 quantifie les surfaces et proportions des diverses classes d'occupation du sol.

Tableau 30: Processus de post-traitement pour l'obtention de la carte d'occupation des sols de la réserve de biosphère de l'OKM

Classification en saison sèche	Classification en saison des pluies	Opération de post-traitement
Forêts denses (FD_{ss})	Forêts denses (FD_{sp})	$FD_f = FD_{ss} + FD_{sp}$
Forets riveraines (FR_{ss})	Forets riveraines (FR_{ss})	$FR_f = FR_{ss} + FR_{sp}$
Savanes arborées (SA_{ss})	Savane arborées (SA_{sp})	$SA_f = (SA_{ss} + SA_{sp}) - (FD_f + FR_f)$
Savanes herbeuses (SH_{ss})	Savanes herbeuses (SH_{sp})	$SH_f = (SH_{ss} + SH_{sp}) - SA_f$
Cours d'Eau (CE_{ss})	Cours d'Eau (CE_{sp})	$CE_f = CE_{ss} + CE_{sp}$
Zone marécageuse (M_{ss})	Zone marécageuse (M_{sp})	$M_f = M_{ss} + M_{sp}$
Sols Nus (SN_{ss})	Sols Nus (SN_{sp})	$SN_f = SN_{ss} + SN_{sp}$

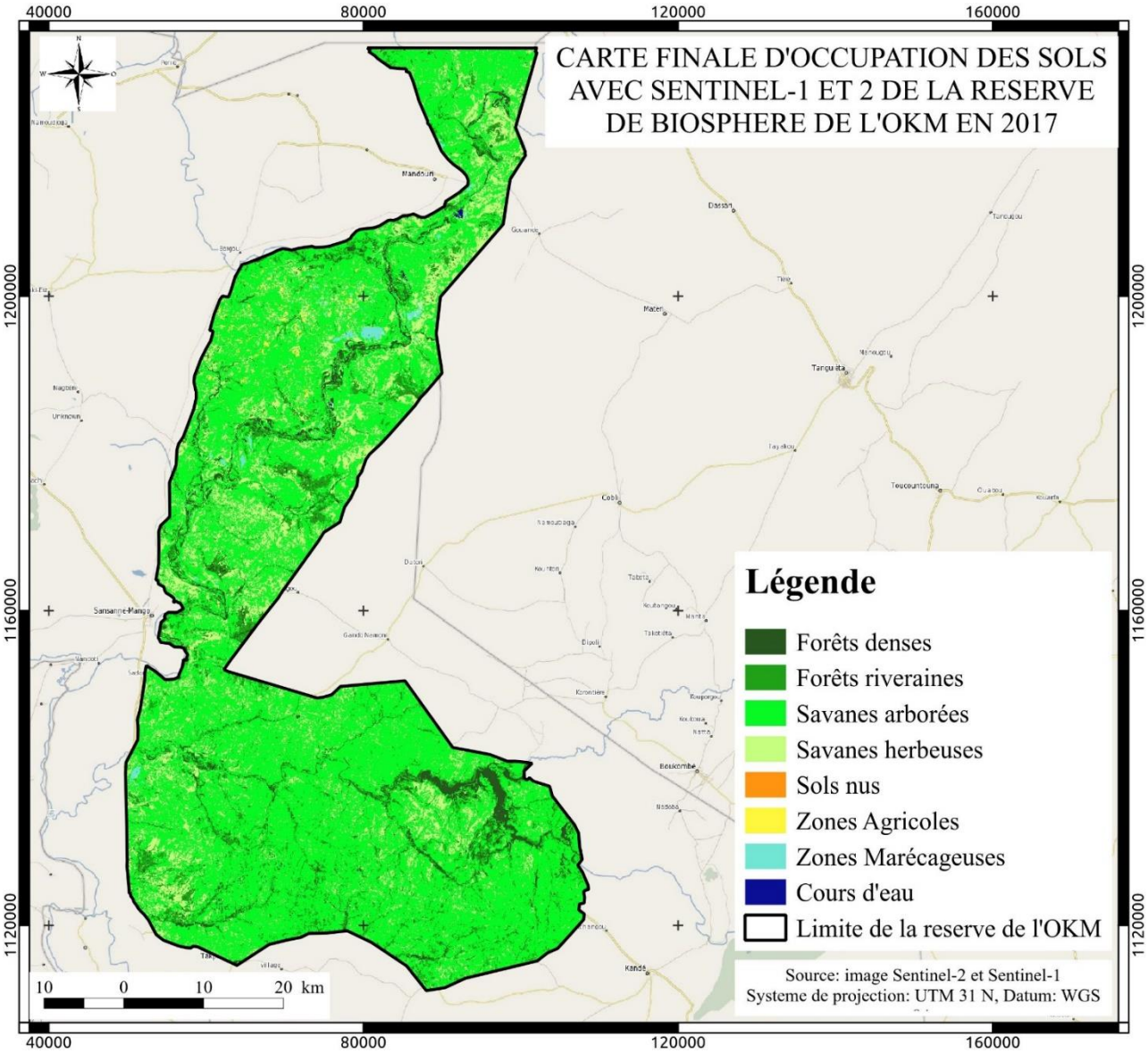


Figure 81:Carte d'occupation des sols de la réserve de biosphère de l'OKM en 2017

Tableau 31: Surfaces et proportions des classes d'occupation des sols de la réserve de biosphère de l'OKM

Classes d'occupation du sol	Surfaces en ha	Proportion (%)
Forêts Denses	11327	3,5
Forêts riveraines	31556	9,7
Savanes Arborées	226811	69,6
Savanes Herbeuses	52736	16,2
Zones Agricoles	2270	0,7
Sols Nus	12	0,004
Zones marécageuses	849	0,3
Cours d'eau	203	0,1
Total	325764	100

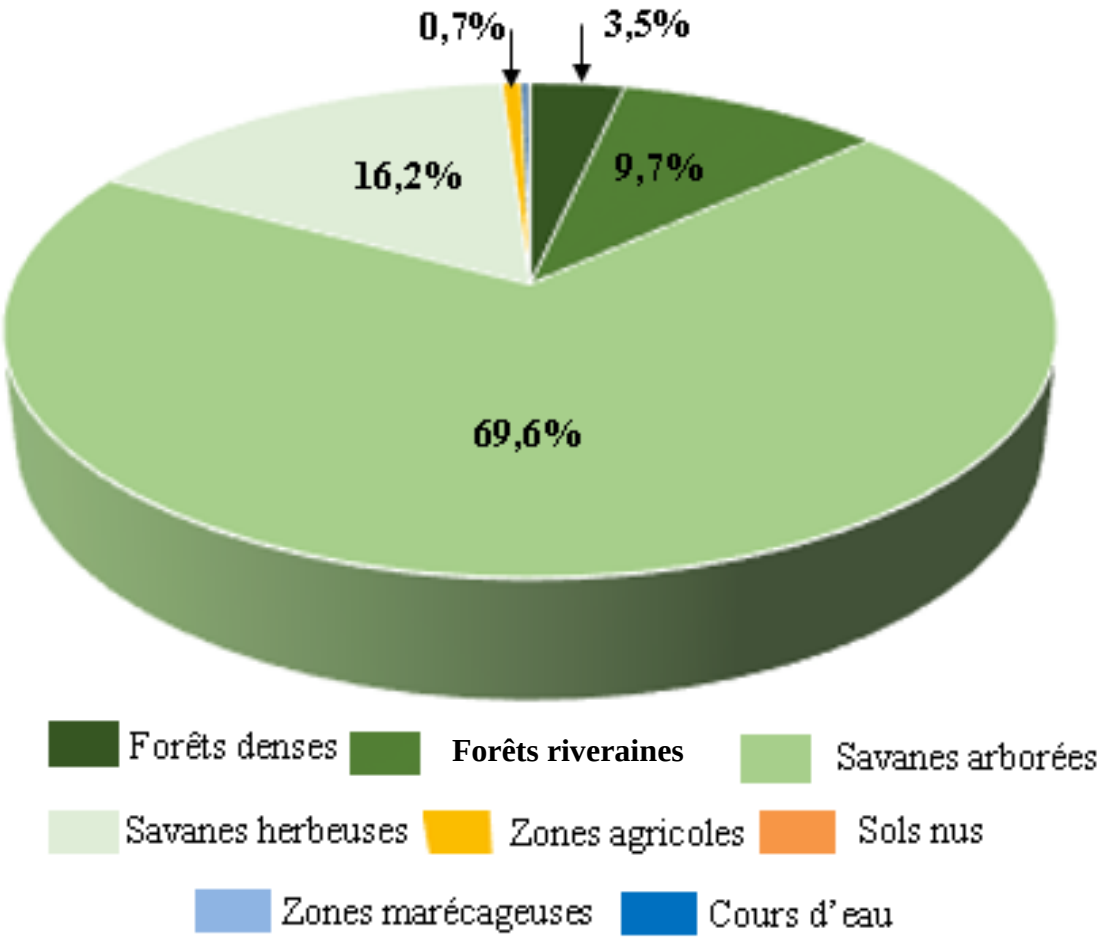


Figure 82: Répartition des classes d'occupation du sol dans la réserve de biosphère de l'OKM en 2017

Les résultats de l'analyse des images satellitaires Sentinel-1 et Sentinel-2 révèlent que le paysage de la réserve de biosphère de l'OKM présente les classes d'occupation suivantes : forêts denses, forêts riveraines, savanes arborées, savanes herbeuses, zones marécageuses, sols nus, zones agricoles et cours d'eau. Les classes forestières représentent au total 13% de la proportion globale de la réserve de biosphère de l'OKM soit une surface de 42800 ha. La classe ''savanes arborées'' représente près de 70% de la réserve et occupe environ 226811 ha. ''Les savanes herbeuses'' qui constituent un mélange entre les jachères, les pâturages et les prairies représentent une surface de 52700 ha soit une proportion de 16%. L'ensemble des zones de savanes (savanes arborées et savanes herbeuses) représente plus de 85 % de la réserve de biosphère. Cet écosystème dominé par les savanes constitue un paysage favorable et un abri pour le développement de la faune sauvage.

Bien que faible, la classe ''zones agricoles'' dans la réserve de biosphère représente 0,7 % soit une surface de 2300 ha. La présence de la classe ''zone agricoles'' de façon permanente (toute l'année) témoigne de l'existence des activités anthropiques à l'intérieur de la réserve. Cela confirme la pression de la population locale à la recherche des terres fertiles pour les activités

agricoles. C'est en somme la prise en compte des besoins de la population et la sauvegarde de ressources naturelles riches et bien diversifiées de la région qui a motivé l'UNESCO à attribuer le label de réserve de biosphère sous la demande des autorités en charge de la gestion des ressources naturelles du pays.

Au-delà du rôle exceptionnel de conservation que la réserve de biosphère de l'OKM joue, cet écosystème peut aussi contribuer grandement dans la séquestration du carbone et donc dans la lutte contre le réchauffement climatique global. Ainsi sur cette classification, au total 50 parcelles d'inventaires ont été placées dans les forêts denses et forets secondaires. Les inventaires ont été réalisés afin d'obtenir des paramètres dendrométriques nécessaires à l'estimation des ressources forestières.

II.2. Inventaire forestier de la réserve de biosphère d'OKM

L'inventaire forestier est réalisé dans les placettes installées dans les classes forêts denses, forêts riveraines (au total sur une surface de 1ha, répartie en 50 placettes échantillonnées de façon aléatoire). Le tableau 32 donne la liste des espèces forestières inventoriées et la moyenne des caractéristiques dendrométriques (hauteurs moyennes, diamètres moyens) à l'hectare.

Les résultats de l'inventaire forestier dans les deux aires protégées (RFT et OKM) n'ont pas pu être comparés avec les résultats de l'inventaire forestier national du Togo (les données de l'inventaire forestier national ne sont pas encore publiques et donc ne peuvent pas être consultées). Ces résultats peuvent contenir des biais et sont donc à prendre à titre indicatif.

Tableau 32: les essences forestières et leurs caractéristiques dendrométriques moyennes à l'hectare

Espèce inventorié	***Nombre d'individu***	***Hauteurs moyenne (m)***	***Diamètre moyen (cm)***
Accacia gourmaensis	*10*	*9*	*17,2*
Allophylus africana	*9*	*13*	*22,3*
Anogeissus leiocarpus	*371*	*25*	*39,5*
Bridelia ferruginea	*4*	*11*	*19,5*
Ceiba pentadra	*5*	*29*	*27,1*
Crossopteryx febrifuga	*22*	*6*	*21,1*
Combretum fragrans	*14*	*12*	*27,2*
Combretum molle	*8*	*9*	*15,2*
Combretum nigricans	*57*	*5*	*15,1*
Dichrostachys cinerea	*19*	*14*	*18,1*
Diospyros mespiliformis	*9*	*18*	*34,5*
Feretia apodanthera	*52*	*6*	*12,1*
Ficus sur	*12*	*9*	*17,2*

Khaya senegalensis	*2*	*12*	*19,1*
Lannea acida	*5*	*8*	*15,1*
Lannea kerstingii	*10*	*7*	*25,2*
Mitragyna inermis	*18*	*9*	*21,7*
Nauclea latifolia	*10*	*7,5*	*13,1*
Piliostigma thonningii	*12*	*5*	*12,2*
Prosopis africana	*17*	*10*	*17,2*
Pseudocedrela kotschyi	*15*	*27*	*17,5*
Ptérocarpus erinaceus	*62*	*17*	*15,7*
Tamarindus indica	*1*	*9,5*	*15*
Tectona grandis	*7*	*12*	*22,1*
Terminalia macroptera	*18*	*28*	*19*
Vitex doniana	*6*	*12*	*13,5*
Vitex madiensis	*1*	*9*	*12,5*
Ziziphus mauritiana	*1*	*10*	*15*
	Total = 777	*Hauteur moyenne = 12,5 m*	*Diamètre moyen = 19,3 Cm*

Les résultats montrent que la densité d'arbre à l'hectare est très élevée avec 777 arbres/ha. L'espèce *Anogeissus leiocarpus* est la plus abondante dans cet écosystème forestier avec 371 pieds /ha. En terme d'abondance on retrouve également *Pterocarpus erinaceus, Feretia apodanthera* et *Combretum nigricans* avec chacun plus de 50 pieds. La surface terrière (m^2/ha) est de 20,2 ± 1,3 m^2/ha.

Le diamètre moyen à 1,30 m des arbres de l'OKM est de 19,3 cm. Les résultats montrent une variabilité importante des diamètres à 1,30 m dans cet écosystème. Les essences à grand diamètre sont *Anogeissus leiocarpus (39,5 cm), Diospyros mespiliformis (34,5 cm), Combretum Fragrans (27,2 cm), Ceiba pentadra (27,1 cm)*. Le reste des arbres inventoriés ont des diamètres inferieurs à 25 cm. Cette faible valeur des diamètres et surtout du diamètre moyen montre l'importance des arbustes dans la réserve. La hauteur moyenne du peuplement est de 12,46 m. On observe une variabilité dans la hauteur entre les essences. Les espèces dont la hauteur moyenne est supérieure à 20 m sont : *Terminalia macroptera (28 m), Ceiba pentadra* (29 m), *Pseudocedrela kotschyi* (27 m), *Anogeissus leiocarpus* (25 m).

Les caractéristiques dendrométriques notamment le diamètre moyen (19,3 cm) et la hauteur moyenne (12,5 m) de l'écosystème forestier de la réserve montre qu'il s'agit essentiellement de formations forestières jeunes avec des arbres en pleine croissance. Ces caractéristiques permettent aussi de supposer que cet écosystème a subi des impacts anthropiques à travers la

coupe des arbres de grands diamètres et de grandes hauteurs et qu'actuellement l'écosystème est en pleine reconstitution.

	
Forêts denses	Forêts denses
	
Forêts denses	Forêts denses
	
Savanes arborées	Savanes boisées
	
Forêts riveraines	Forêts riveraines

Figure 83: Photographies lors de mission de terrain dans la réserve de biosphère de l'OKM en Juin 2018 (Mission Kemavo)

Tableau 33: Récapitulation des données d'inventaires de la réserve de biosphère de l'OKM

Caractéristiques	**Valeur enregistrée**
Surface d'inventaire (totale)	1 hectare
Nombre d'individus total	777
Nombre d'espèce	28
Diamètre moyen le plus élevé	39,5 cm
Diamètre moyen le moins élevé	12,1 cm
Hauteur moyenne la plus élevée	29 m
Hauteur moyenne la moins élevée	5 m
Hauteur moyenne globale	12,5 m
Surface terrière	20,2 m^2/ha

En phase de croissance et de reconstitution les jeunes formations végétales, notamment les forêts jeunes, utilisent d'importantes quantités de CO_2 pour la fabrication des matières organiques et de la lignine. Ces écosystèmes jouent un rôle important dans la réduction de la quantité de CO_2 atmosphérique et donc un rôle important dans la lutte contre le réchauffement climatique. Il serait important d'estimer la quantité de CO_2 séquestrée par les forêts de cette réserve de biosphère afin d'évaluer leur contribution dans la lutte contre les changements climatiques.

III. Cas de la réserve de RFT

III.1 Production de la carte d'occupation des sols de 2017

L'objectif de ce paragraphe est de présenter les résultats des traitements des images Sentinel-1 et de la combinaison d'image Sentinel-1 et Alos-2 pour la saison sèche puis pour la saison pluvieuse.

III.1.1 Cartes en saison sèche

- *Analyse d'image Sentinel-1*

La matrice de confusion (tableau 35) obtenue à l'issue de la classification des images montre que la précision producteur globale est de 81,6%. Les classes de ‘‘forêts denses’’ et de ‘‘forêts riveraines’’ ont des précisions producteur respectivement de 87,7% et 85,2%. On observe d'importantes confusions entre ces deux classes et les ‘‘zones urbaines’’. La précision producteur de ‘‘savanes arborées’’ est de 66,5%. Cette classe se confond avec toutes les autres classes et plus fortement avec la classe ‘‘savanes herbeuses’’ et la classe ‘‘zones urbaines’’. La classe ‘‘zones agricoles’’ présente des confusions avec ‘‘les zones urbaines’’ avec une précision producteur de 74%. Cette confusion se manifeste par une précision utilisateur très faible de 25%. La confusion entre les classes de forêts et les autres classes témoigne d'une omission de détection de forêts. Ces omissions peuvent s'expliquer par la faible sensibilité de la signature de la végétation dans la bande C dans laquelle signe le capteur Sentinel-1 avec la double polarisation VV et VH.

Tableau 34: Matrice de confusion de la classification des images Sentinel-1 de la zone de la RFT en saison sèche

	Forêts denses	forêts riveraines	Savanes arborées	savanes herbeuses	Zones urbaines	Zones Marécageuses	Cours d'Eau	Zones Agricoles	Total	Précision utilisateur (%)
Forêts denses	**644**	12	11	89	0	27	0	0	783	82,2
forêts riveraines	1	**872**	19	24	7	0	0	13	936	93,2
Savanes arborées	2	8	**821**	40	1	28	0	3	903	90,9
Savanes herbeuses	6	43	137	**635**	0	66	0	4	891	71,3
Zones urbaines	61	84	118	62	**216**	11	0	290	842	25,7
Zones Marécageuses	20	0	79	57	0	**859**	0	0	1015	84,6
Cours d'eau	0	0	0	0	0	0	**974**	0	974	100
Zones agricoles	0	4	49	0	39	0	0	**900**	992	90,7
Total	734	1023	1234	907	263	991	974	1210	7336	
Précision Producteur %	**87,7**	**85,2**	**66,5%**	**70,0**	**82,1**	**86,7**	**100**	**74**		
Précision Moyenne %	**81,6**									

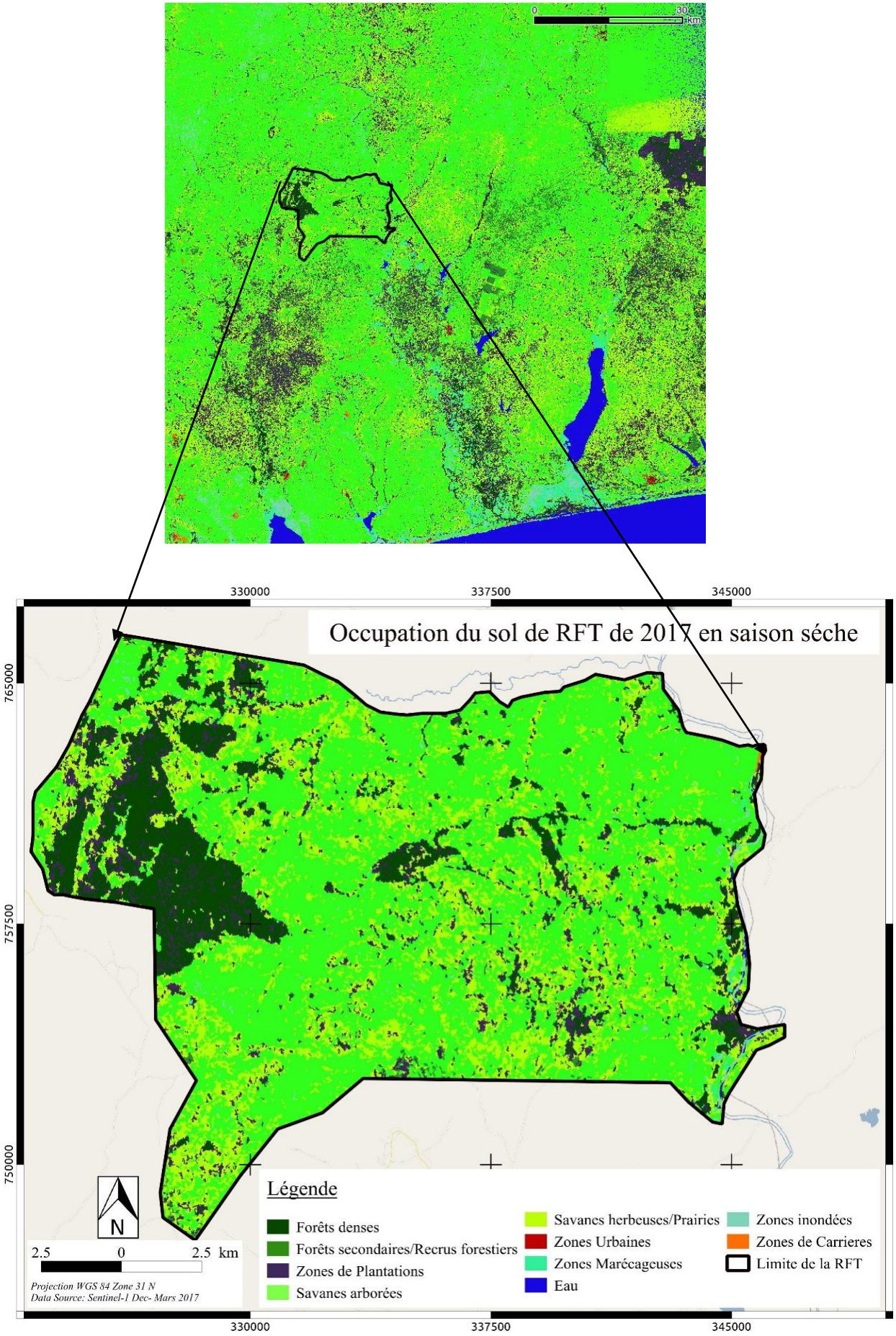


Figure 84: Carte d'occupation de la RFT en saison sèche avec des images Sentinel-1

La capacité limitée de la bande C à discriminer les niveaux de biomasse élevés explique la mauvaise précision producteur obtenue pour les classes des savanes arborées et savanes herbeuses (66,5% et 70%). On constate que les classes marécageuses sont bien discriminées avec une précision producteur et une précision utilisateur de l'ordre de 90%, plus élevées que pour les autres classes. Ce résultat confirme aussi la sensibilité importante de Sentinel-1 en bande C à l'humidité du sol même très peu végétalisé, comme c'est le cas pour la classe zone marécageuse.

Une carte d'occupation du sol de référence est produite en 2013 pour la RFT par le Ministère de l'Environnement et des Ressources Forestières (MERF). En comparant nos résultats à cette carte de référence, on remarque que dans cette classification il y a une surestimation de la classe ‘‘savanes herbeuses’’ au dépend de la classe ‘‘savanes arborées et boisées’’. Cela peut s'expliquer par le fait qu'en saison sèche ‘‘les savanes arborées et boisées’’ constituées essentiellement d'essences décidues perdent leurs feuilles et ressemblent plus à une zone de ‘‘savanes herbeuses’’ qu'à une zone de ‘‘savanes arbustives et boisées’’.

Les omissions ou les manques de détection des classes de forêts constituent un biais dans l'estimation des surfaces de forêts et donc perturbent l'estimation précise de stock du carbone de la RFT.

- *Analyse de la combinaison des images Sentinel-1 et Alos-2*

La précision producteur globale est de 90,4% d'après la matrice de confusion (tableau 35) obtenue à l'issue de la classification de la combinaison des images Sentinel-1 et Alos-2. La précision de la classe forêts denses est de 94,3% bien supérieure à la précision producteur obtenue lors de la classification des images Sentinel-1 seules. Cette amélioration de la précision producteur montre la contribution de la bande L avec les polarisations HH et HV à la discrimination des forêts. Pour la classe ‘‘forêts secondaires’’, on observe une confusion avec toutes les autres classes et surtout avec les classes ‘‘savanes arborées’’ et ‘‘zones urbaines’’. Sa précision producteur est de 85,1%.

On observe encore des confusions entre les savanes (savanes arborées et savanes herbeuses). Malgré ces confusions on enregistre une meilleure détection de ces deux classes par rapport à leurs détections avec les images Sentinel-1. Leurs précisions ‘‘producteurs’’ sont respectivement de 85% et 79%. Ces premiers résultats montrent la complémentarité entre les images Sentinel-1 en bande C de polarisations VV, VH et les images Alos-2 de polarisations HH et HV pour la discrimination des classes d'occupation du sol. La figure 85 présente le résultat de la classification des deux images (Sentinel-1 et Alos-2).

Tableau 35: Matrice de confusion de la classification de la combinaison des images Sentinel-1et Alos-2 de la zone de RFT en saison sèche

	Forêts denses	forêts riveraines	Savanes arborées	savanes herbeuses	Zones urbaines	Zones Marécageuses	Eau	Zones Agricoles	Total	Précision utilisateur (%)
Forêts denses	**551**	31	0	15	2	0	0	0	599	92
forêts riveraines	1	**925**	1	4	1	0	0	2	934	99
Savanes arborées	1	50	**436**	54	3	10	0	1	555	78,6
Savanes herbeuses	6	27	30	**510**	2	26	0	1	602	84,7
Zones urbaines	12	39	5	19	**548**	0	0	24	647	84,7
Zones Marécageuses	13	12	23	41	5	**557**	0	0	651	85,6
Cours d'eau	0	0	0	0	0	0	**724**	0	724	100,0
Zones de carrières	0	3	18	0	50	0	0	**666**	737	90,4
Total	584	1087	513	643	611	593	724	694		
Précision Producteur %	**94,3**	**85,1**	**85**	**79,3**	**89,7**	**93,9**	**100**	**96**		
Précision Moyenne %	**90,4**									

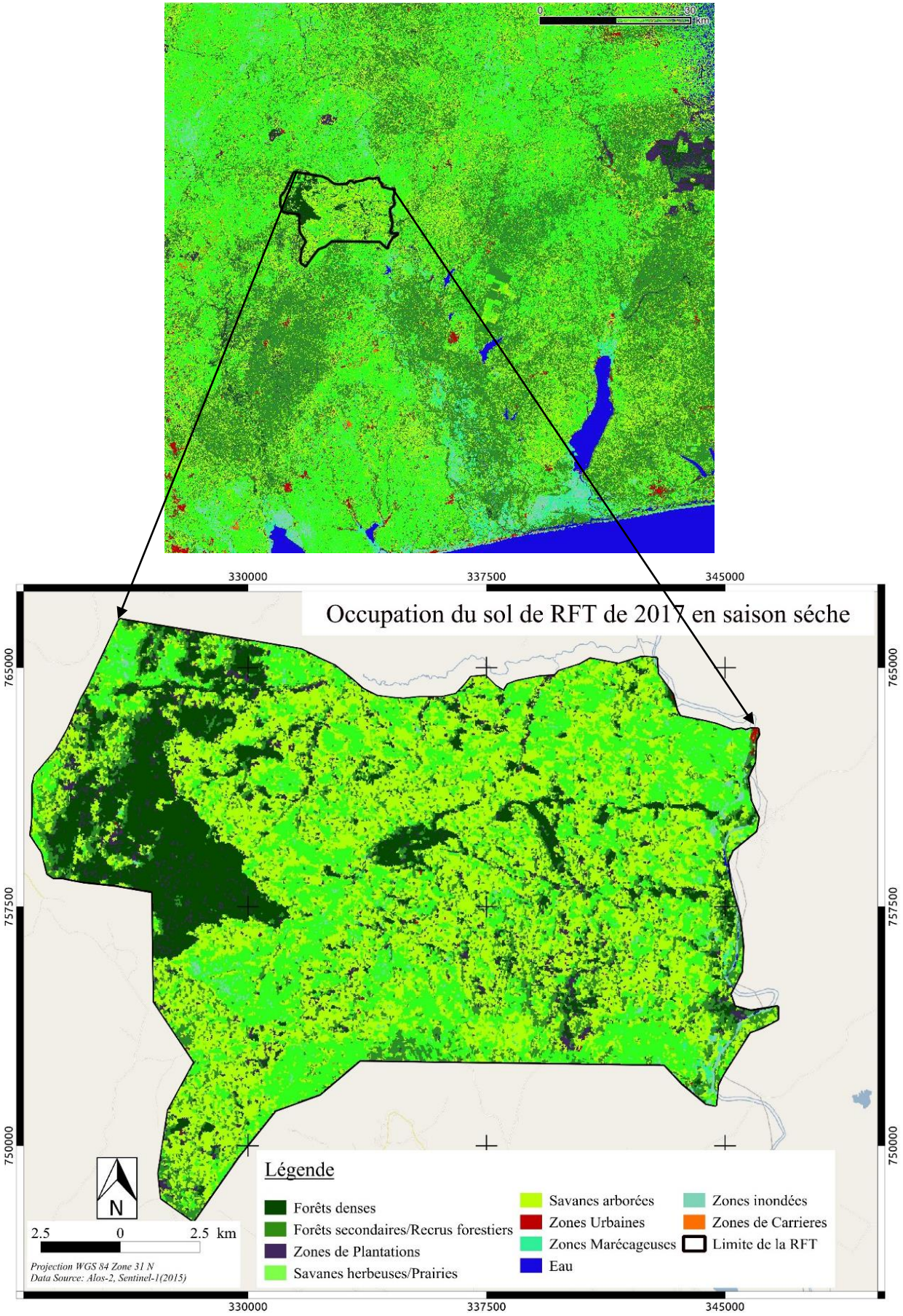


Figure 85: Carte d'occupation de la RFT en saison sèche avec la combinaison d'image Sentinel-1 et Alos-2

IV.1.2 Cartes en saison des pluies

- *Analyse des images Sentinel-1*

Cette classification est similaire à celle de la saison sèche (voir tableau 34). Sa précision globale est de 75%. On observe une confusion entre les classes de ‘‘forêts denses’’ et de ‘‘forêts secondaires’’ et elle s’accompagne d’une sous-évaluation des classes forestières par rapport à la carte de référence de 2013. Par contre cette sous-évaluation reste faible par rapport à ce qui a été observé en saison sèche. En saison des pluies, l’activité chlorophyllienne entraine une meilleure détection de cette formation (forêts).

Les classes cours d’eau sont bien discriminées avec une précision producteur de 100%. Cette bonne détection est due à la surface lisse des cours d’eau, très discriminante.

Tableau 36: Matrice de confusion de la classification des images Sentinel-1 de la zone de RFT en saison des pluies

	Forêts denses	Forêts secondaires	Savanes arborées	savanes herbeuses	Zones urbaines	Zones Marécageuses	Eau	Zones agricoles	Total	Précision utilisateur (%)
Forêts denses	**631**	63	50	92	3	187	0	5	1031	61,2
Forêts secondaires	65	**904**	11	43	28	12	0	26	1089	83,0
Savanes arborées	11	17	**773**	158	2	70	0	3	1034	74,8
Savanes herbeuses	28	27	220	**589**	4	39	0	3	910	64,7
Zones urbaines	17	16	19	20	**652**	12	0	67	803	81,2
Zones Marécageuses	34	21	82	69	0	**607**	0	1	814	74,6
Cours d'eau	0	0	0	0	0	0	**954**	0	954	100
Zones de carrières	4	87	20	9	207	3	0	**680**	1010	67,3
Total	790	1135	1175	980	896	930	954	785		
Précision Producteur %	**79,9**	**79,6**	**65,8**	**60,1**	**72,8**	**65,3**	**100**	**86,6**		
Précision Moyenne %	**76,3**									

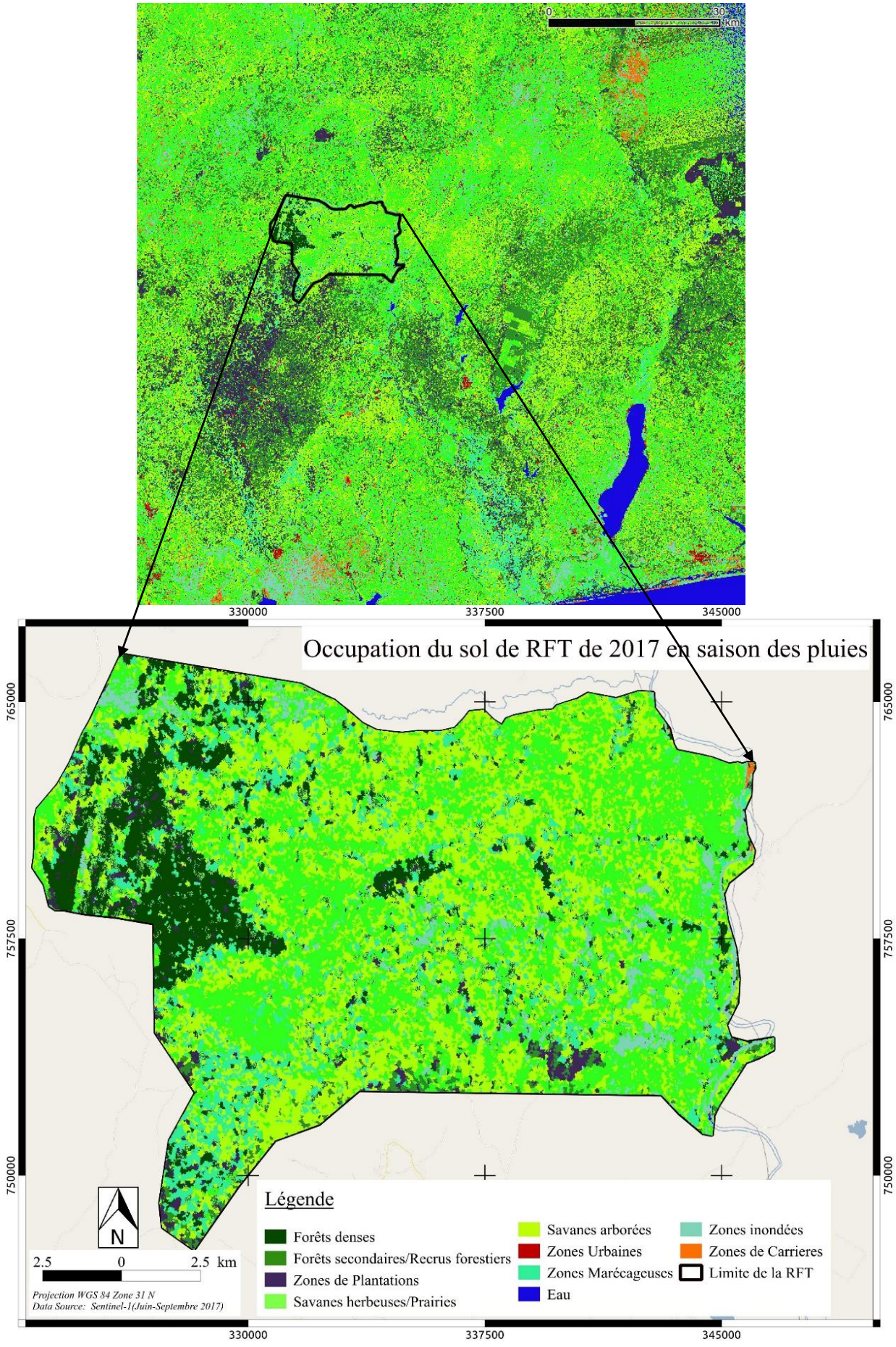


Figure 86:Carte d'occupation de la RFT en saison des pluies avec les images Sentinel-1

- *Analyse de la combinaison d'image Sentinel-1 et Alos-2*

La précision producteur globale de la classification de la combinaison des images Sentinel-1 et Alos-2 est de près de 90% d'après la matrice de confusion (tableau 37). Les classes de forêts denses, de forêts secondaires, de plantations sont bien isolées avec les précisions producteurs respectivement de 84%, 87% et 89%. On obtient les mêmes niveaux de précisions utilisateurs pour ces trois classes forestières de 86%, 88% et 89%.

Il existe toujours une confusion entre les ‘‘classes savanes arborées’’ et ‘‘savanes herbeuses’’ mais les limites des ‘‘savanes arborées’’ concordent mieux avec la carte de référence de la RFT. Les précisions producteur et utilisateur sont respectivement de 89% et 84%.

Les classes de zones marécageuses, de cours d'eau et de zones inondées sont aussi bien détectées avec des précisions producteurs de 83%, 100% et 90%.

Ces résultats montrent que l'association des images Sentinel-1 en bande C de polarisations VV, VH et des images Alos-2 en bande L de polarisations HH, et HV est très efficace pour la cartographie des surfaces végétalisées tropicales.

Tableau 37: Matrice de confusion de la classification de la combinaison des images Sentinel-1 et Alos-2 de la zone de RFT en saison des pluies

	Forêts denses	Forêts secondaires	Savanes arborées	savanes herbeuses	Zones urbaines	Zones Marécageuses	Eau	Zones de carrières	Total	Précision utilisateur (%)
Forêts denses	**860**	11	0	36	9	12	0	1	929	92,6%
Forêts secondaires	12	**873**	5	25	4	42	0	8	969	90,1%
Savanes arborées	0	7	**1018**	71	0	44	0	1	1141	89,2%
Savanes herbeuses	57	33	69	**755**	6	46	0	2	968	78,0%
Zones urbaines	6	17	3	8	**900**	7	0	17	958	93,9%
Zones Marécageuses	6	48	26	21	3	**834**	0	2	940	88,7%
Cours d'eau	0	0	0	0	0	0	**965**	0	965	100,0%
Zones de carrières	0	13	3	0	29	6	0	**938**	989	94,8%
Total	941	1002	1124	916	951	991	965	969		
Précision Producteur %	**91,4%**	**87,1%**	**90,6%**	**82,4%**	**94,6%**	**84,2%**	**100,0%**	**96,8%**		
Précision Moyenne %	**90,9%**									

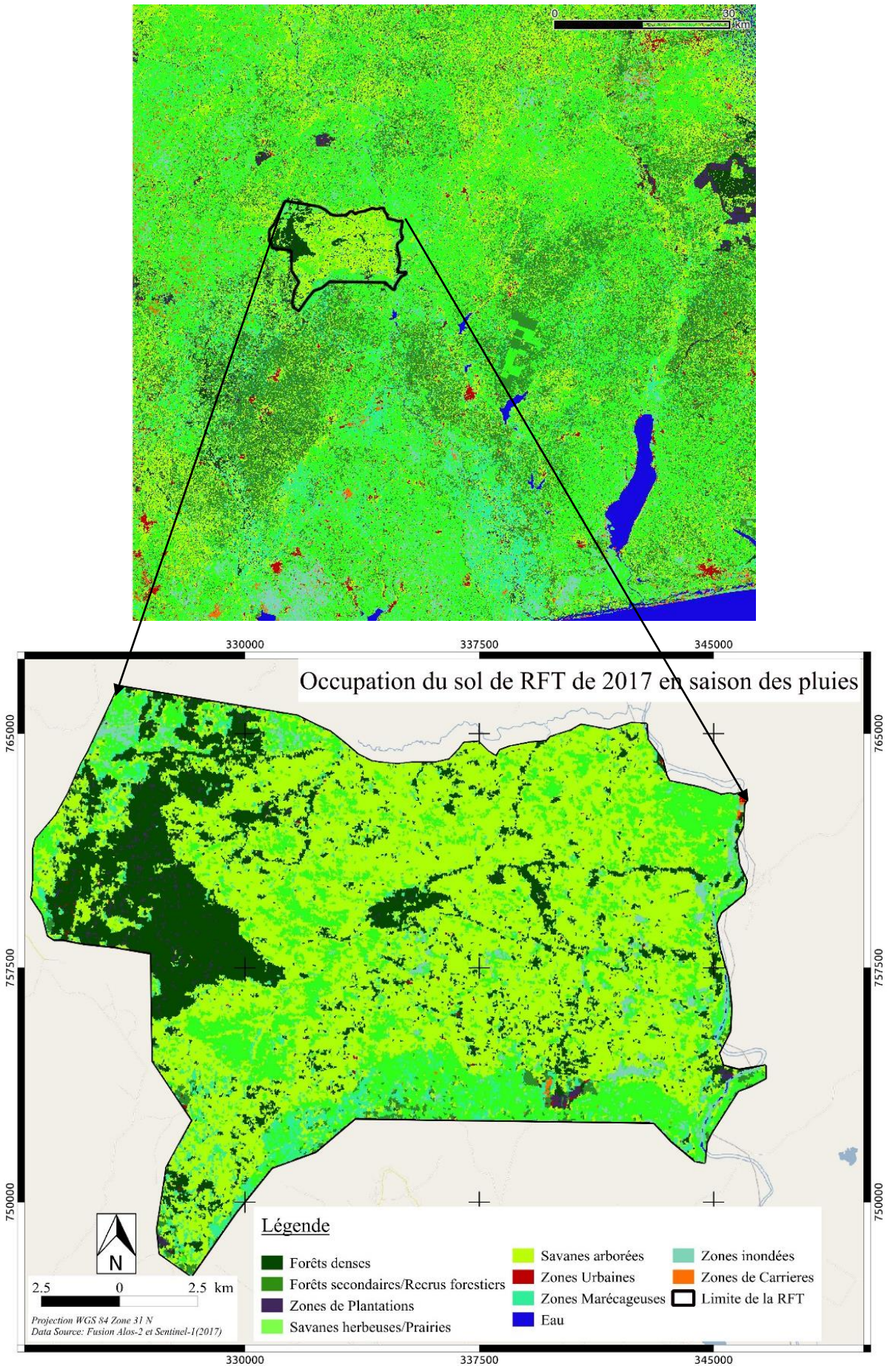


Figure 87:Carte d'occupation de la RFT en saison des pluies avec la combinaison d'image Sentinel-1 et Alos-2

- *III.1.3 Carte finale et statistiques des classes d'occupation du sol*

Afin d'obtenir une carte d'occupation du sol la plus complète et plus réaliste possible de la RFT, nous avons procédé à un post-traitement combinant les deux classifications obtenues en saison sèche et saison humide avec les images Sentinel-1 et Alos-2. Le tableau suivant montre les opérations réalisées lors du posttraitement.

Tableau 38: Processus de post-traitement pour l'obtention de ma carte d'occupation des sols de la RFT

Classification en saison sèche	**Classification en saison des pluies**	**Opération de post-traitement**
Forêts denses (FD_{ss}) forêts riveraines (FR_{ss}) Savanes arborées (SA_{ss}) Plantation (P_{ss}) Savanes herbeuses (SH_{ss}) Cours d'Eau (CE_{ss}) Marécage (M_{ss}) Zone inondé (ZI_{ss}) Zone de carrières (ZC_{ss})	Forêts denses (FD_{sp}) forêts riveraines (FR_{ss}) Savane arborées (SA_{sp}) Plantation (P_{sp}) Savanes herbeuses (SH_{sp}) Cours d'Eau (CE_{sp}) Marécage (M_{sp}) Zone inondé (ZI_{sp}) Zone de carrières (ZC_{sp})	$FD_f = FD_{ss} + FD_{sp} + P_f$ $FS_f = FR_{ss} + FR_{sp}$ $SA_f = (SA_{ss} + SA_{sp}) - (FD_f + FR_f)$ $SH_f = (SH_{ss} + SH_{sp}) - SA_f$ $CE_f = CE_{ss} + CE_{sp}$ $M_f = M_{ss} + M_{sp} + ZI_{ss} + ZI_{sp}$ $ZC_f = ZC_{ss} + ZC_{sp}$

La figure 88 présente le résultat final de la carte de la RFT et le tableau 39 indique les surfaces de chaque classe d'occupation du sol. En prenant appui sur les classifications, des parcelles d'inventaires ont été définies dans les forêts denses et forêts riveraines afin de mesurer les paramètres nécessaires à l'évaluation de ressources forestières.

Tableau 39: Proportions des classes d'occupation des sols de la zone de RFT

Classe d'occupation du sol	**Surface (ha)**	**Proportion (%)**
Forêts denses	5024 (±731)	20
forêts riveraines	2580 (±377)	10
Savanes arborées	13405 (±1474)	52.6
Savanes herbeuses	4373 (±887)	17.1
Cours d'Eau	8	0.03
Marécage	110 (±4)	0,3
Total	26700	100

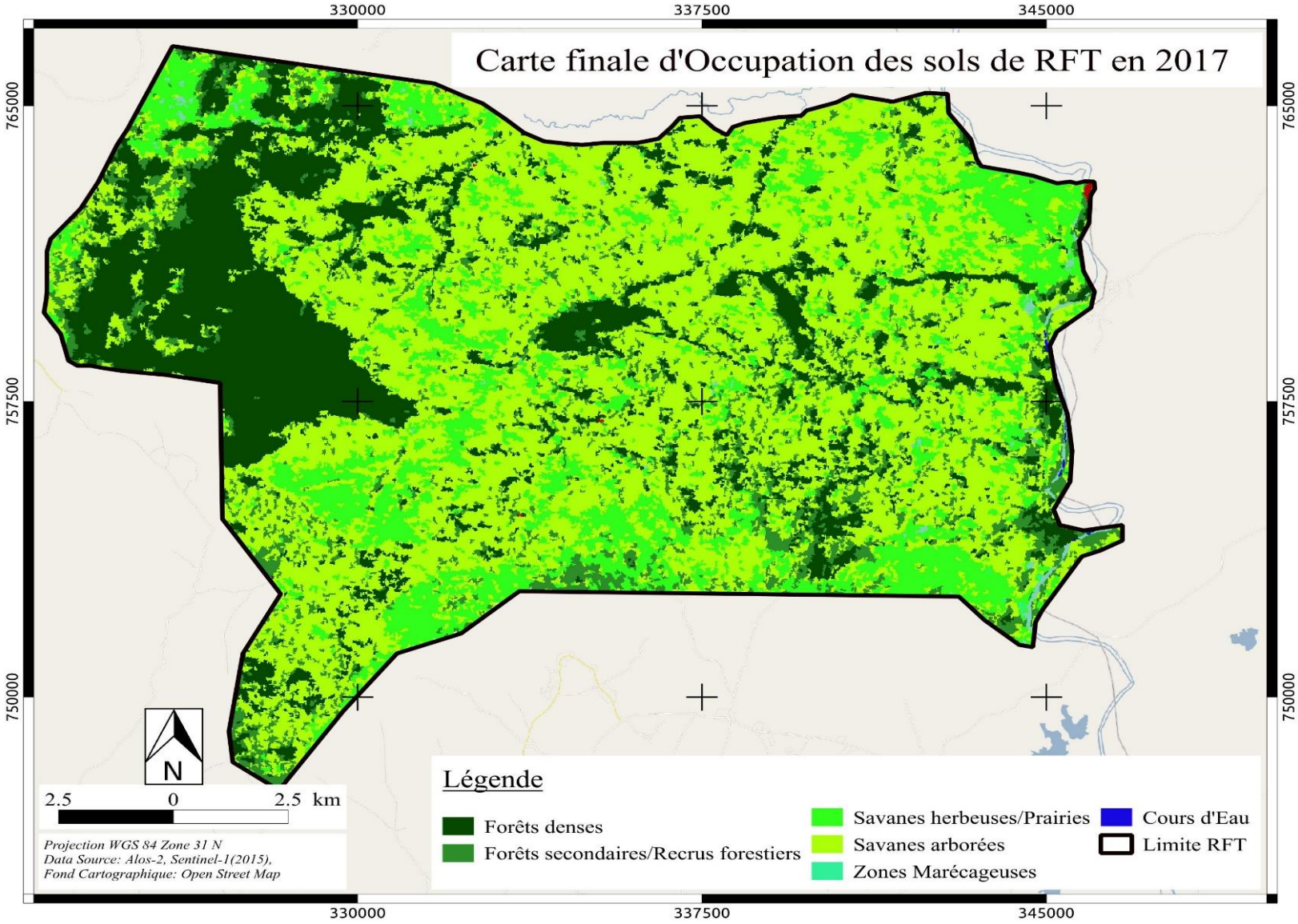


Figure 88: Carte finale d'occupation du sol de la zone de RFT en 2017

L'analyse des images Sentinel-1 et Alos-2 de la RFT en saison sèche et saison pluvieuse a permis d'extraire avec plus de précision les classes d'occupation du sol. Ainsi deux classes, se distinguant par leur niveau de densité d'arbre, ont pu être extraites. Il a été également distingué les classes de savanes arborées et de savanes herbeuses, les classes ‘‘zones marécageuses’’ et ‘‘cours d'eau’’. Ces résultats montrent que les surfaces forestières représentent 30% de la RFT soit une surface totale de 7600 ha. Les savanes arborées représentent plus de 52,6% de la RFT soit une surface de 13400 ha. Les savanes herbeuses représentent 17% de la RFT soit une surface de 4300 ha. L'ensemble des classes de savane représente près de 70% de la surface du RFT (environ 18 000 ha). Ces résultats statistiques confirment les valeurs obtenues lors des travaux réalisés en 2011 par Adjonou (Adjonou et al, 2013).

Cet écosystème savanicole est assez unique au niveau de la région car il constitue un refuge pour la faune sauvage, ce qui explique son classement en ‘‘réserve de faune’’ par les autorités responsables de la gestion des forêts du Togo.

Au-delà de ce rôle d'abri pour la faune sauvage, cet écosystème pourra contribuer à la séquestration de carbone. Pour évaluer cette capacité, nous présenterons dans le paragraphe suivant les résultats relatifs à l'inventaire forestier et à l'évaluation du stock de carbone séquestré.

III.2 Résultat de l'inventaire forestier

Le tableau 40 liste les différents types d'essences forestières ainsi que la moyenne de leurs caractéristiques dendrométriques mesurées sur 50 placettes (surface totale de 1 ha) inventoriées à proportion égale dans les forêts denses et les forêts secondaires.

Tableau 40: Les essences forestières et leurs caractéristiques dendrométriques moyennes à l'hectare dans la RFT

Espèce inventorié	***Nombre d'individu***	***Hauteurs moyenne (m)***	***Diamètre moyen (cm)***
Afzelia africana	*7*	*15*	*20,1*
Albizia ferruginea	*7*	*9*	*19*
Antiaris africana	*19*	*20,7*	*85,5*
Baphia nitida	*5*	*9*	*15*
Canthium horizontale	*12*	*15*	*21,5*
Cassipourea barteri	*9*	*8*	*17,2*
Ceiba pentadra	*19*	*19*	*112,2*
Celtis integrifolia	*12*	*15*	*16,2*
Celtis zenkeri	*16*	*15,5*	*101,1*
Dialium guineense	*49*	*17*	*25,2*

Dichapetalum madagascariense	*18*	*13*	*17*
Diospyros mespiliformis	*43*	*15*	*15,01*
Diospyros monbuttensis	*6*	*10*	*21,2*
Drypetes floribunda	*297*	*15*	*45*
Drypetes parvifolia	*45*	*14*	*17,5*
Erythrophloeum suaveolens	*2*	*15*	*20*
Ficus thonningii	*1*	*10*	*15*
Hildegardia barteri	*37*	*22,5*	*98*
Lannea acida	*9*	*6*	*19,1*
Lecaniodiscus cupanioides	*4*	*7*	*17,5*
Malacantha alnifolia	*15*	*14*	*17,2*
Mallotus oppositifolius	*10*	*7*	*18,1*
Microdesmis puberula	*16*	*14*	*16,2*
Monodora tenuifolia	*11*	*9*	*15,7*
Ochna afzelii	*8*	*14,5*	*20*
Pancovia bijuga	*25*	*14,5*	*17,2*
Permna angolensis	*1*	*6*	*15*
Ricinodendrum heudoletti	*44*	*17,5*	*108*
Ritchiea duchesnei	*27*	*8*	*21,1*
Rothmannia urcelliformis	*73*	*14*	*19,9*
Sapium ellipticum	*5*	*12*	*18*
Spondias mombin	*4*	*8*	*18*
Triplochiton scleroxylon	*14*	*20,5*	*17,5*
Vampylospermum flavum	*6*	*9*	*19,2*
Zanthoxylum leprieurii	*10*	*12,5*	*18,2*
	886	*Hauteur moyenne = 12,9*	*Diamètre moyen = 30,8*

	
Forêts denses	Forêts denses
	
Savanes arborées	Savanes arborées
	
Savanes arborées	Savanes arborées
	
Savanes herbeuses	Savanes arborées

Figure 89: Photographies lors de mission de terrain dans la réserve de faune de Togodo en Juin 2018 (Mission Kemavo)

La densité d'arbre à l'hectare est de 886 arbre/ha. On retrouve au rang des espèces les plus représentées *Drypetes floribunda* (297 pieds/ha), *Rothmannia urcelliformis* (73 pieds/ha), *Dalium guineense* (49 pieds/ha), *Drypetes parvifolia* (45 pieds/ha), *Ricinodendrum heudoletti* (44 pieds/ha). *Diospyros mespiliformis* (43 pieds/ha). Les six espèces précitées représentent

plus de 60% de la densité des forêts de la réserve. On retrouve également des espèces qui sont rares dans la réserve comme *Permna angolensis, Ficus thonningii*, *Erythrophieum suaveolens*.

Le diamètre moyen à 1,30 m des arbres est de 30,8 cm. Les résultats montrent que la distribution des diamètres à 1.30 m est très variable. On observe des espèces avec des diamètres de plus de 100 cm. On peut citer par exemple les essences comme *Ceiba pentadra* (diamètre moyen de l'espèce à 1.30m est de 112 cm), *Ricinodendrum heudoletti* (diamètre moyen de l'espèce à 1.30 m est de 108 cm), *Celtis zenkeri* (diamètres moyenne à de l'espèce 1.30 et de 101 cm). La majorité des arbres inventoriés ont des diamètres entre 15 et 35 cm. Cet indicateur correspond à un état moyennement avancé de l'évolution de la transition de savanes arborées et boisées vers la forêt avec des especes dont le diamètre moyen est tres élevé mais moins représentatives de la population globale.

La hauteur moyenne est de 12,9 m avec beaucoup de différences entre les individus inventoriés. La moyenne des hauteurs de certaines espèces peut dépasser les 20 m comme c'est le cas pour *Triplochiton scleroxylon (20,5 m), Hildegardia barteri (22,5 m), Antiaris africana (20,7 m).* La majorité des arbres inventoriés ont des hauteurs variant entre 10 et 15 m. la surface terriere calcluée est de 38,9 m^2/Ha.

Plus de 30 espèces d'arbres dont les diamètres supérieurs à 10 cm ont été rencontrées. Cela traduit une diversité importante dans la RFT. Les caractéristiques dendrométriques, notamment le diamètre moyen (30,8 cm) et la hauteur moyenne (12,9 m) de l'écosystème, montrent qu'il s'agit essentiellement de forêts secondaires avec un état de reconstitution évolué. On peut ainsi supposer que les arbres de grands diamètres ont été exploités (activités anthropiques importantes) ce qui explique la faible abondance des arbres de diamètre supérieur à 100 cm. La présence de diamètres de valeurs intermédiaires montre que cette réserve est relativement bien conservée et qu'il est à l'abri de l'impact négatif des activités anthropiques depuis plusieurs années après que l'exploitation des grands arbres ait eu lieu.

Tableau 41: Récapitulation des données d'inventaires de la RFT

Caractéristiques	**Valeur enregistrée**
Surface d'inventaire (totale)	1 hectare
Nombre d'individus total	886
Nombre d'espèce	35
Diamètre moyen le plus élevé	112,2 cm
Diamètre moyen le moins élevé	15 cm
Hauteur moyenne la plus élevée	22.5 m
Hauteur moyenne la moins élevée	6 m
Hauteur moyenne globale	12,9 m
Surface terrière	38,9 m^2/ha

IV. Conclusion et incertitude

L'analyse des images satellitaires optiques (Sentinel-2) et radar (Sentinel-1 et Alos-2) effectuée de façon séparée ou en combinaison sur le site de la RFT et de la réserve de biosphère de l'OKM a permis de produire des cartes d'occupation du sol en saison sèche et en saison des pluies. Ainsi une carte plus précise est produite en combinant les cartes produites par saison en privilégiant les formations forestières.

Sur le site de la RFT le couvert forestier global est estimé à 7600 ha ce qui représente 30% de la surface globale.

La réserve de biosphère de l'OKM est couverte par 42883 ha de formations forestières et représente 13,2% de la surface totale de la réserve de biosphère.

Les inventaires forestiers de terrain ont permis d'évaluer sur chaque site les ressources forestières et leurs richesses spécifiques.

Partie II :

Chapitre VI : Etude de cas en Guyane : la plaine littorale de Kourou et la zone frontière de Saint Georges de l'Oyapock

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats de deux types d'application. La première concerne l'approche automatique de détection de changement avec la méthode de décomposition en ondelettes. Cette méthode est appliquée sur la zone du pont reliant Saint-Georges de l'Oyapock et l'état d'Amapa au Brésil. La Deuxième application concerne l'évaluation des limites de discrimination et de caractérisation des classes d'occupation des sols sur les images par photo-interprétation. Pour cette application, nous allons comparer dans un premier temps les résultats de classifications réalisées sur des données Sentinel-1 avec les produits de la base de données cartographiques de l'IGN. Cette application est réalisée sur la zone test de la plaine littorale de Kourou.

I. Application de la décomposition en ondelettes pour la détection et la caractérisation des changements dans la zone située autour du pont reliant Saint-Georges de l'Oyapock et l'état d'Amapa au Brésil.

I.1.Description des Sites

I.2 Résultat d'analyse

I.3. Conclusion

II. Caractérisation détaillée des classes d'occupation du sol sur la plaine littorale de Kourou

II.1. Les critères d'interprétation et de discrimination des classes d'occupation de sol.

II.1.1. les Critères relatifs aux seuils de représentations des classes

II.1.2. les Critères relatifs à la séparabilité des classes

II.2. Caractéristiques des strates d'occupation des sols Définition des classes d'occupation du sol

II.3. Démarche d'analyse et d'interprétation :

II.3.1. Extraction automatique des classes sur l'image Sentinel-1 par classification.

II.3.2. Approche d'analyse et de photo-interprétation.

II.4. Conclusion

I. Application de la décomposition en ondelettes pour la détection et la caractérisation des changements dans la zone située autour du pont reliant Saint-Georges de l'Oyapock et l'état d'Amapa au Brésil.

I.1. Introduction

Ces résultats sont les fruits de la collaboration que nous avons établie avec le Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance (LISTIC), de l'université Savoie Mont Blanc. Cette collaboration est à la l'origine d'un article présenté à la 21st International Conference on Information Fusion (FUSION). *[AKRM2018] A. M. Atto , A. Kemavo, J.-P. Rudant, G. Mercier, Geometric Multi-Wavelet Total Variation for SAR Image Time Series Analysis, 21st International Conference on Information Fusion (FUSION), Cambridge, United Kingdom, July 10-13, 2018.*

Il s'agit des résultats expérimentaux sur une série temporelle d'image Radar Sentinelle-1-A / B acquise de 2015-12-05 à 2017-12-09 (87 images GRD Dual-PolSAR, VV VH) après l'application de la méthode de décomposition des ondelettes pour détecter les changements.

En effet cette méthode est conçue pour le suivi des glaciers à partir des images satellites de très haute résolution (taille de pixel de l'ordre de 1m). L'objectif de cette phase expérimentale est de voir les résultats que pouvait donner l'application de cette méthode sur les images Sentinel-1 en profitant de la haute fréquence d'acquisition du capteur.

I.2. Sites expérimentaux

Pour rappel, le site d'essais est situé autour du pont reliant Saint-Georges de l'Oyapock et l'état d'Amapa au Brésil. Dans cette zone 13 régions d'intérêt à comportement suspicieux de la GMWTV (**G**eometric **M**ulti-**W**avelet **T**otal **V**ariation, le comportement suspect signifie qu'il y a un changement) ont été sélectionnées elles sont situées entre les latitudes 03°33 'à 04°26' et entre les longitudes 51°04 'à 51°54'. Le tableau 42 donne les coordonnées (latitude et longitudes) des centres de chaque région d'intérêt.

Tableau 42: Coordonnées (Latitude- Longitude) des sites à comportements suspicieux de la GMWTV. Le Rayon ROI est donné en pixels, la taille du pixel est d'environ 150m^2

Numéro Roi	Latitude	Longitude	Rayons
01	03°58'44.55"N	51°43'30.57"W	10
02	03°58'28.18"N	51°45'31.59"W	16
03	03°53'04.31"N	51°45'09.66"W	09
04	03°51'47.29"N	51°46'23.26"W	28
05	03°50'59.68"N	51°45'09.50"W	11
06	03°50'53.64"N	51°44'36.93"W	12
07	03°50'45.14"N	51°46'12.23"W	06
08	03°50'44.44"N	51°45'11.21"W	30

09	03°50’04.76”N	51°45’44.71”W	10
10	03°48’21.54”N	51°45’17.95”W	10
11	03°45’46.39”N	51°45’26.45”W	16
12	03°45’28.00”N	51°45’11.81”W	11
13	03°38’55.02”N	51°35’08.28”W	99

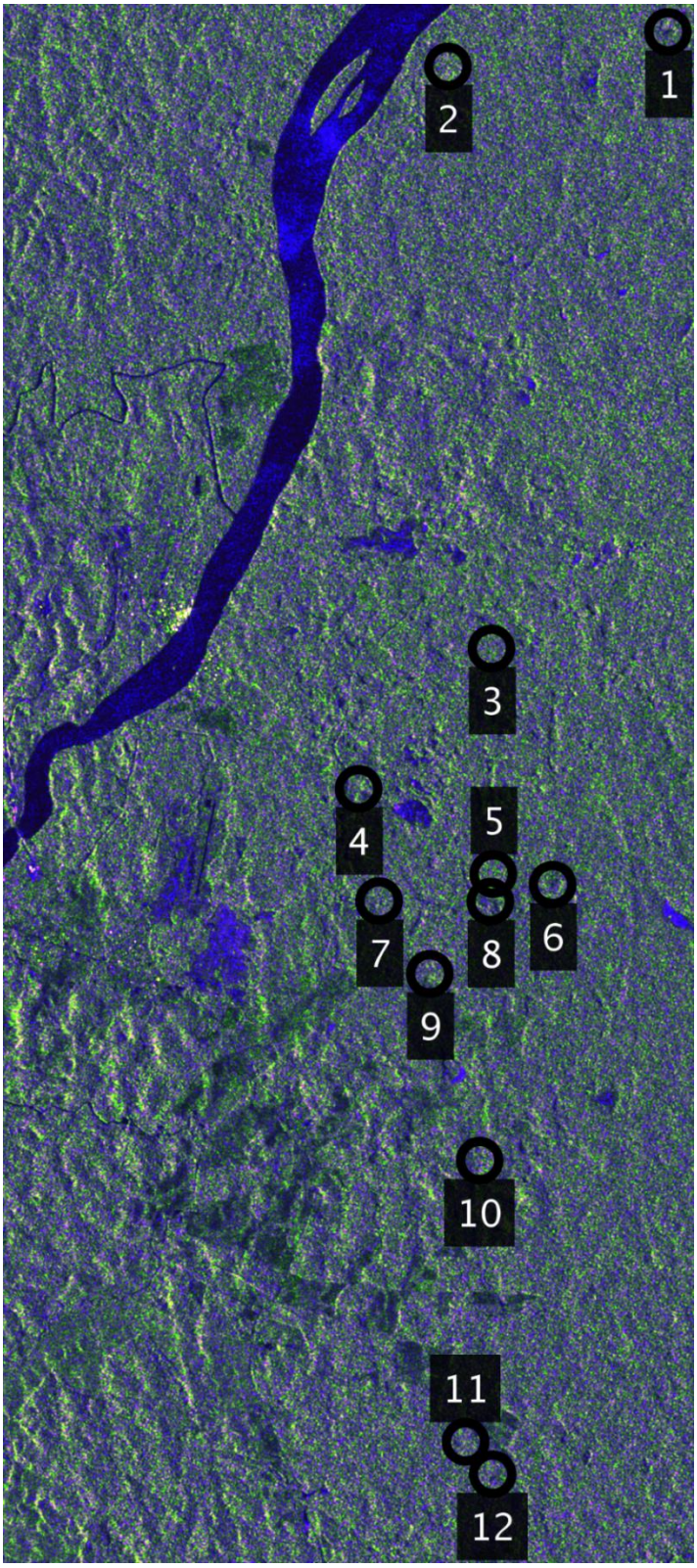


Figure 90: Sous-sélection d'image montrant 12 Région d’Intérêt parmi les 13 étudiées ou il y a des comportements suspicieux de la GMWTV (voir tableau 52). Image Sentinel-1A

I.3.Résultats

Pour l'analyse nous suivrons le diagramme ITS (**I**terative **T**ime **S**erie) illustré par la figure 91.

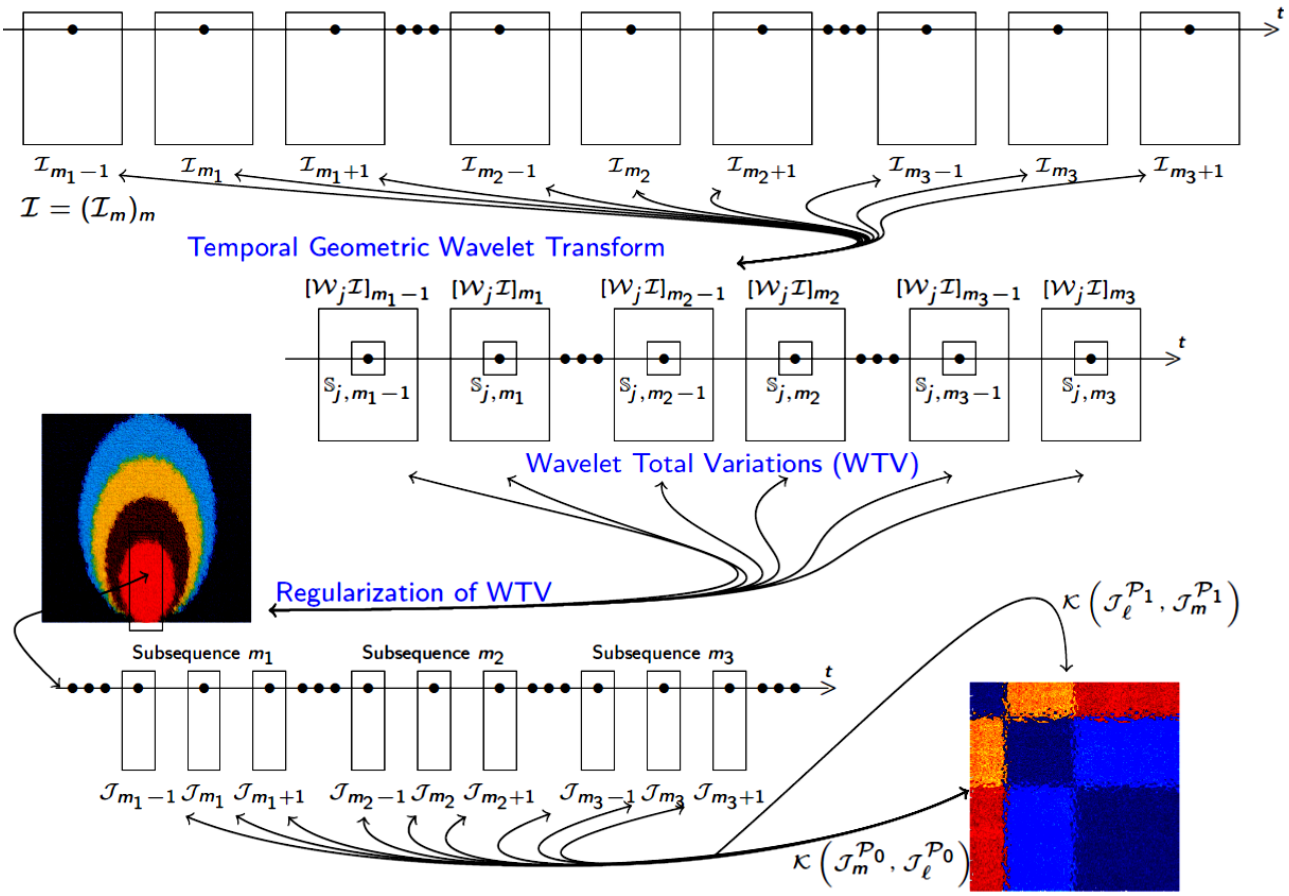


Figure 91:Diagramme de l'analyse ITS. Les WTV sont calculés au niveau des pixels sur de vastes zones spatiales. Les régions à grand WTV sont ensuite analysées par MDDM (niveaux de sous-image / patch).

Nous sélectionnons des poids associés à la GMWTV fusionnée à partir du filtrage d'ondelettes. En imbriquant la complémentarité dans le domaine de Fourier (filtres haute et passe-bande), nous obtenons une atténuation importante des basses fréquences $\alpha_2 = 1/2$ et $\alpha_1 = \alpha_3 = 1/4$. Les mesures de la GMWTV sont basées sur une gamme de plusieurs années du site de test et la carte dérivée met en évidence plusieurs types de dynamiques. Les GMWTV des 13 zones décrites dans le tableau 42 sont données dans la Figure 91. Comme on peut le voir sur cette figure, les pixels centraux associés aux 13 zones ont des comportements anormaux (couleurs vives). Pour chaque pixel central des régions d'intérêt décrites précédemment, nous avons aussi déterminé tous les pixels qui ont subi des changements en partant du pixel central. Le Tableau 55 présente pour chaque région d'intérêt des pixels qui ont changés.

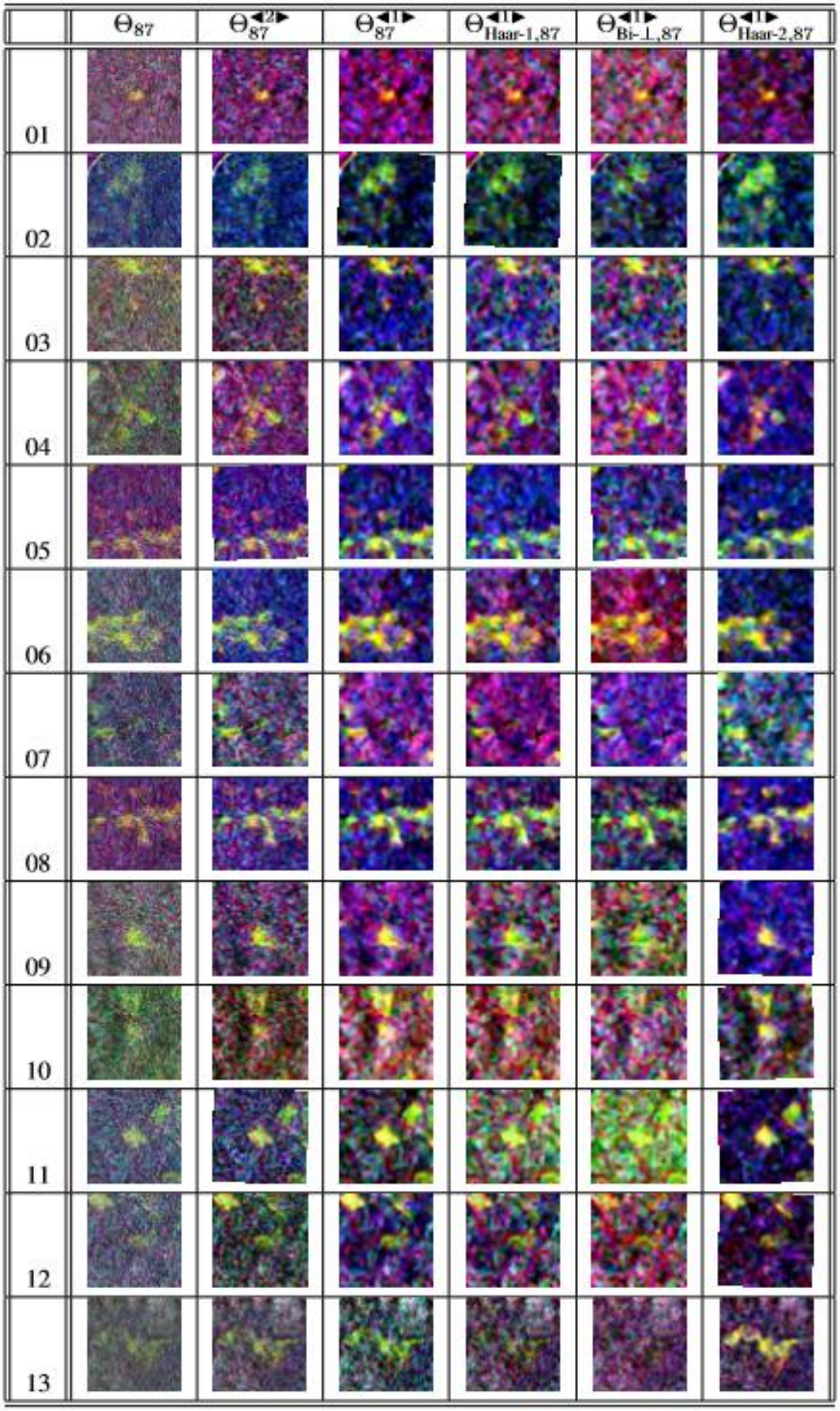


Figure 92: 128 × 128 sous-sélections de WTV Θ •, 87 et GMWTV Θ87 autour des zones présentant des comportements anormaux présentées dans le tableau 52.

La figure 92 montre que la GMWTV Θ 87 est bruitée, comme prévu. Sa l^2 version régularisée **Θ<2> 87** est plus informative, mais moins homogène que la régularisation récursive l^1 (comparaisons entre les colonnes associées à **Θ<1> 87** et **Θ<2> 87**). De plus, la **GMWTV Θ<1> 87** (multi-ondelettes) est plus discriminante que n'importe quelle simple ondelette GWTV: en comparant la colonne associée à **Θ<1> 87** aux colonnes associées respectivement à **Haar-1 (Θ <1> Haar-1,87)**, Bi-⊥ **(Θ<1> Bi -⊥, 87)** et les GWTVs **Haar-2 (Θ<1> Haar-2,87).**

Enfin, les MDDM (Multi-Date Divergence Matrice) asymétriques (VH, VV) sont calculées pour les 13 ROI et présentées sur la figure 94.

L'application de la méthode permet d'obtenir tous les types de changements sur la zone Saint-George de l'Oyapock.

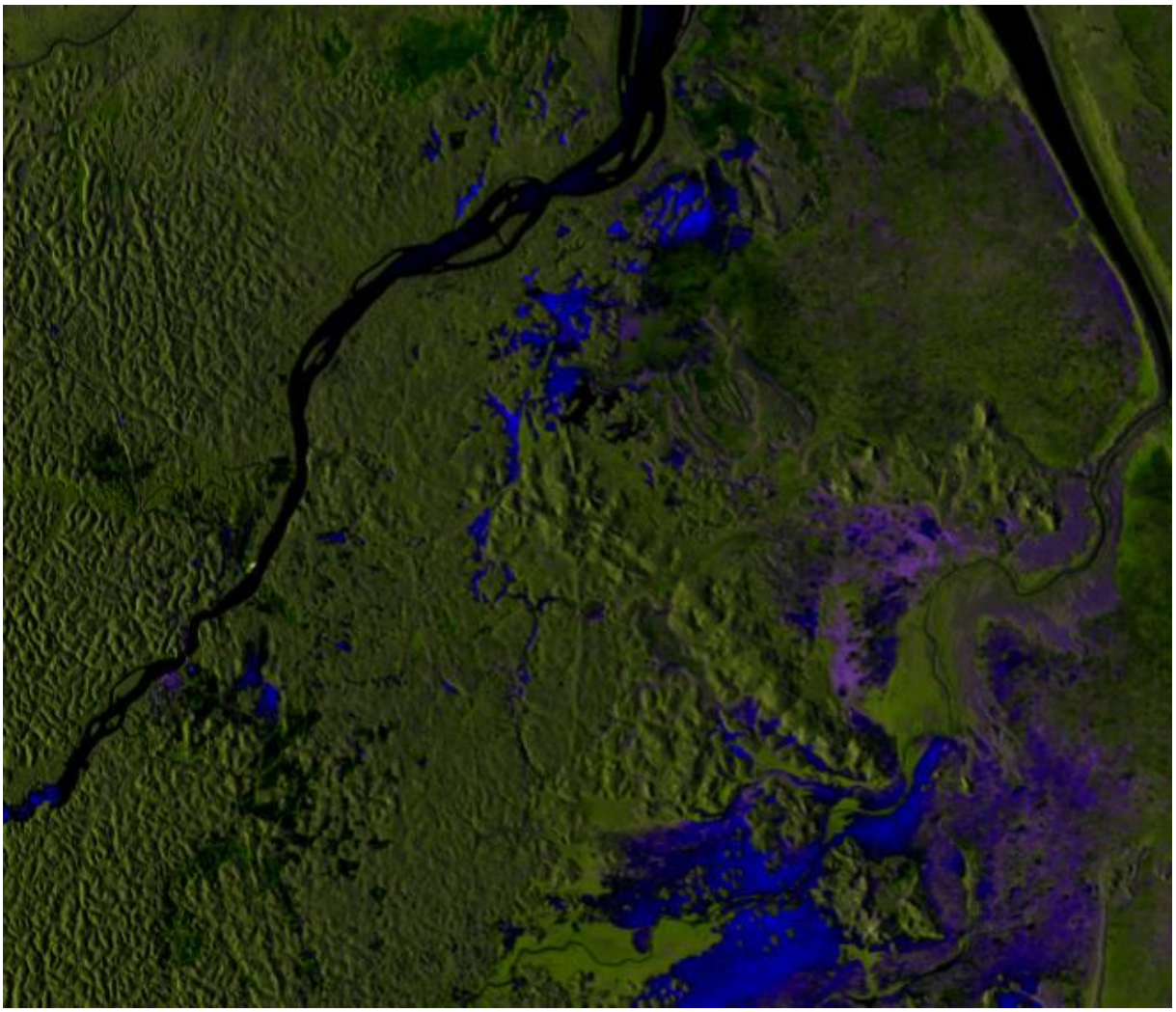


Figure 93: Illustration de zone de changement détecté par la métode de décomposition enondellette. Les zones en Bleu sont les zones où il y a eu un changement entre 2015-05-12 et 2017-12-03

Les changements identifiés ont été caractérisés par la suite avec les connaisances de terrain et sur la base de l'interprétation des MDDM en fonction des variations de couleur des lignes, des colonnes et des diagonales permettent de tirer les conclusions suivantes:

- Les régions d'intérêts associées à un seul changement sont :
    - Site 01 (changement brusque avec variabilité saisonnière) ;
    - Site 02 (changements progressifs avec presque aucune variabilité saisonnière visible).
- Les régions d'intérêts associées à plusieurs changements sont les suivants:
    - Sites 04, 06, 08, 09, 12, 13 (avec une variabilité saisonnière visible) ;
    - Sites 03, 05, 07, 10, 11 (pas de saisonnalité visible).

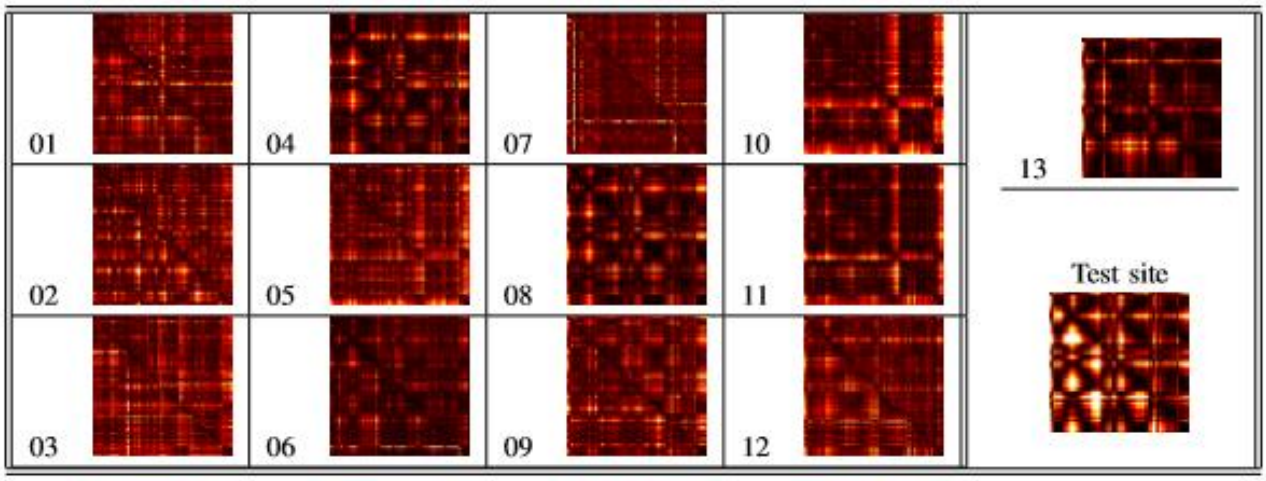
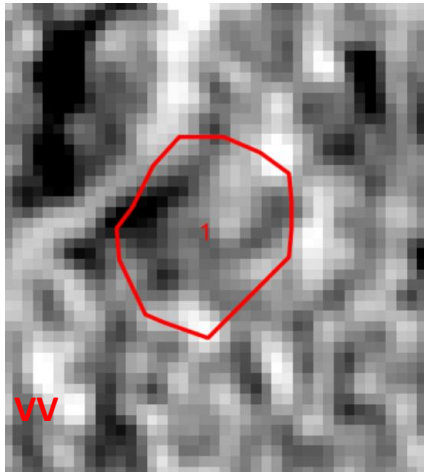
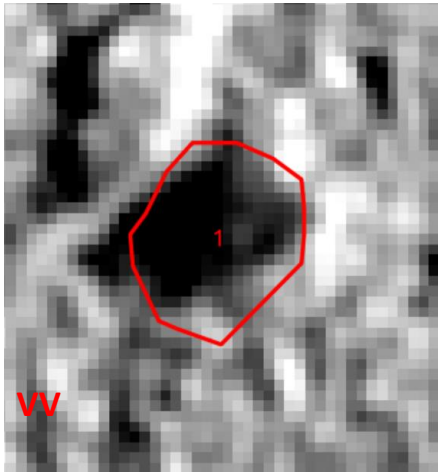
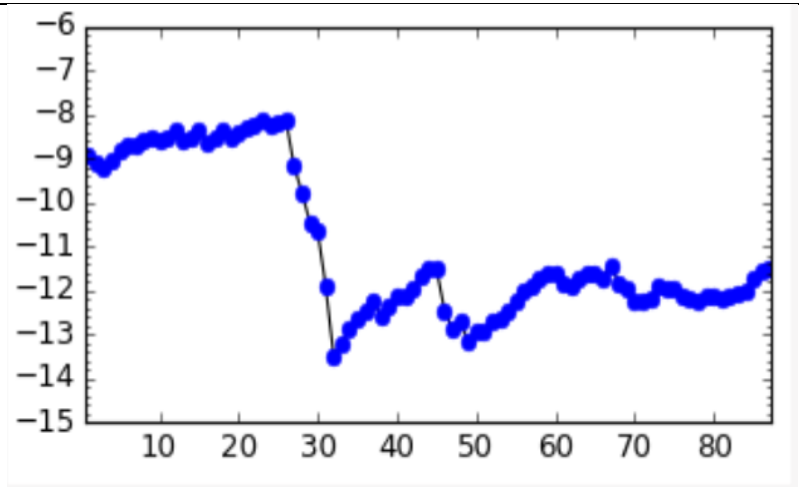
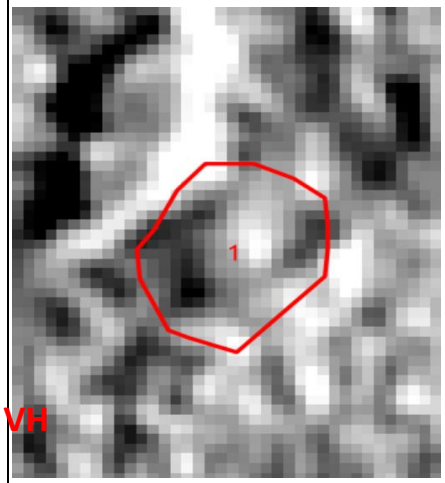
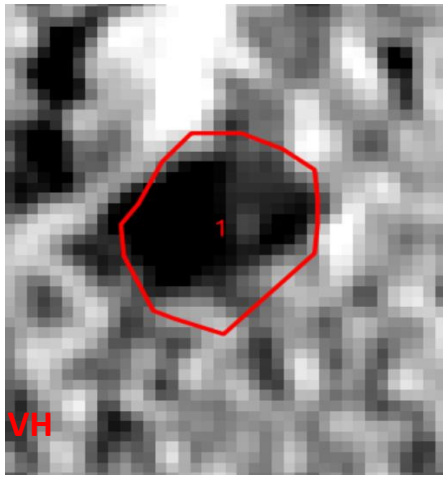
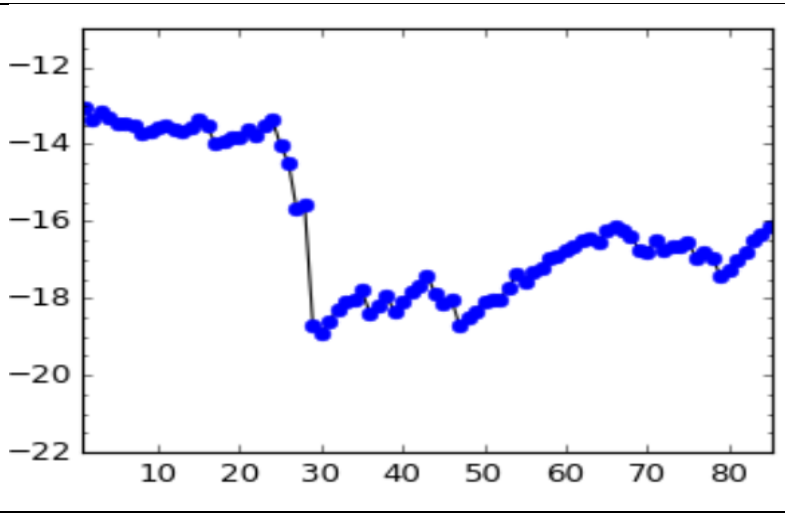
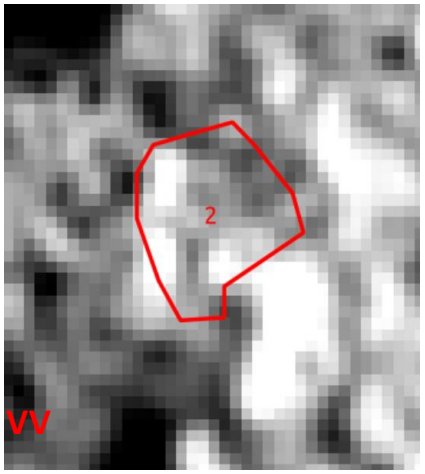
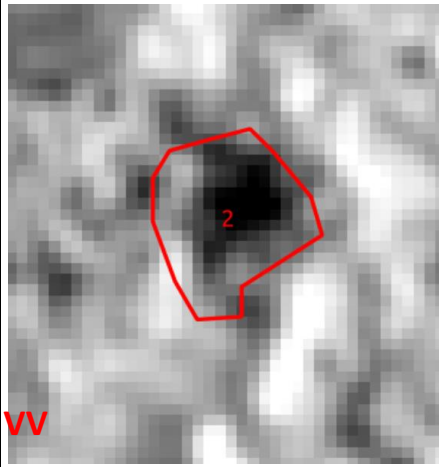
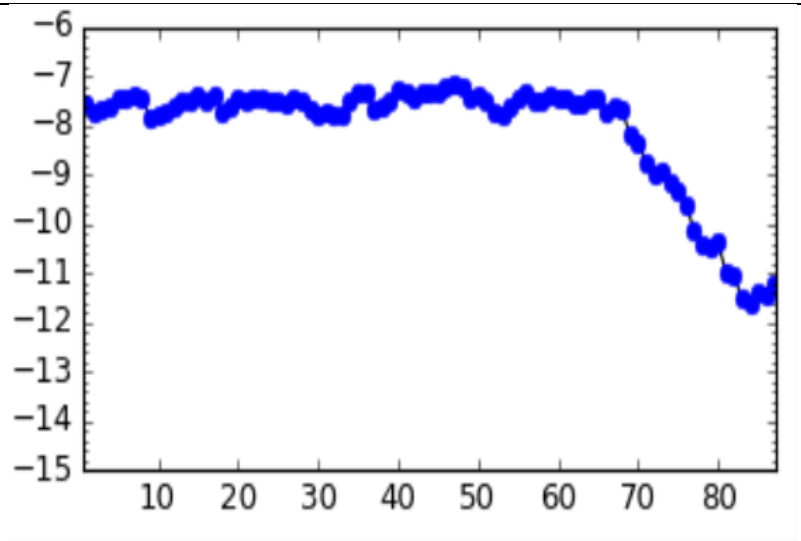
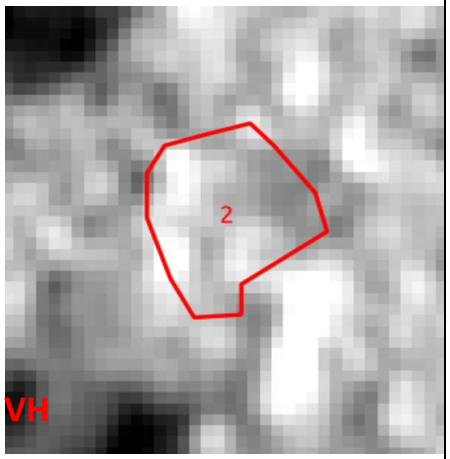
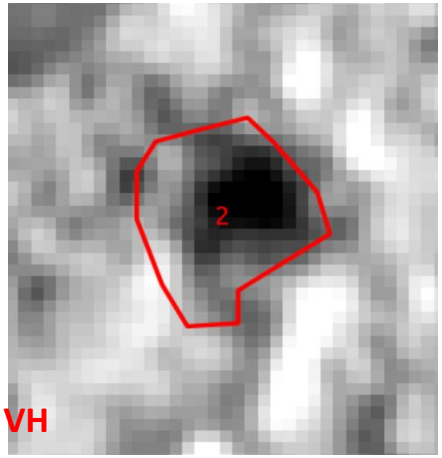
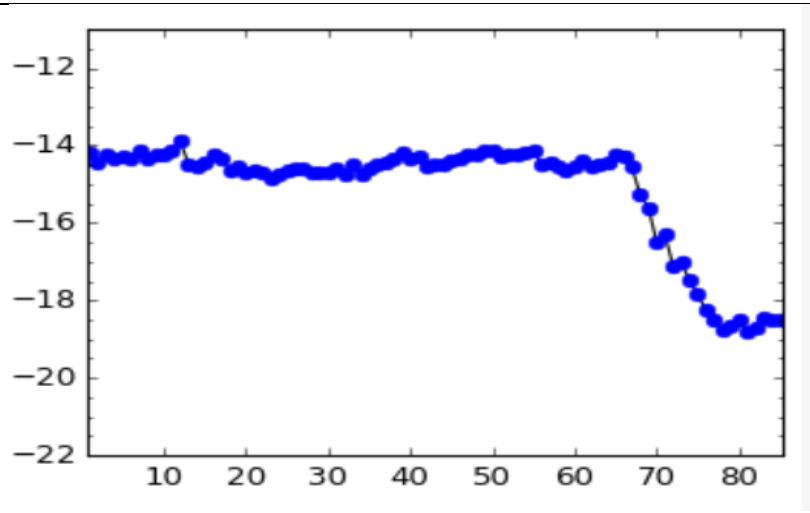


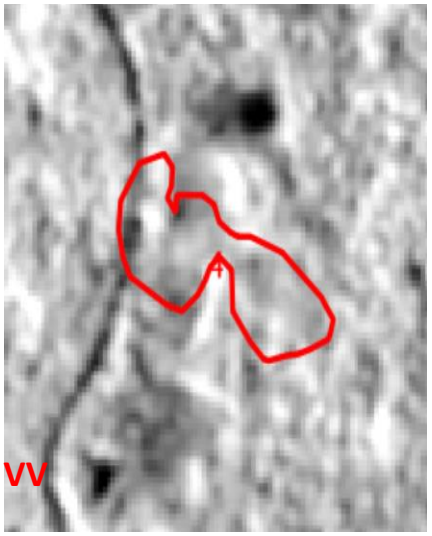
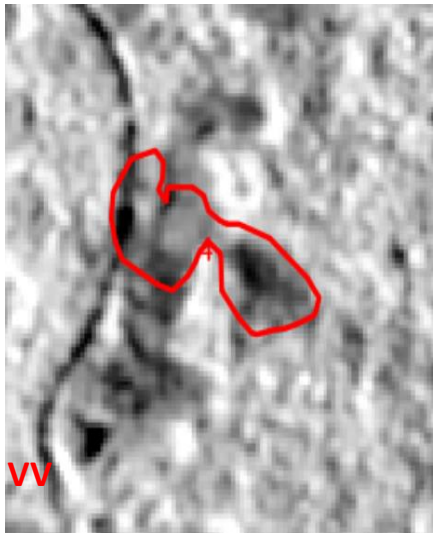
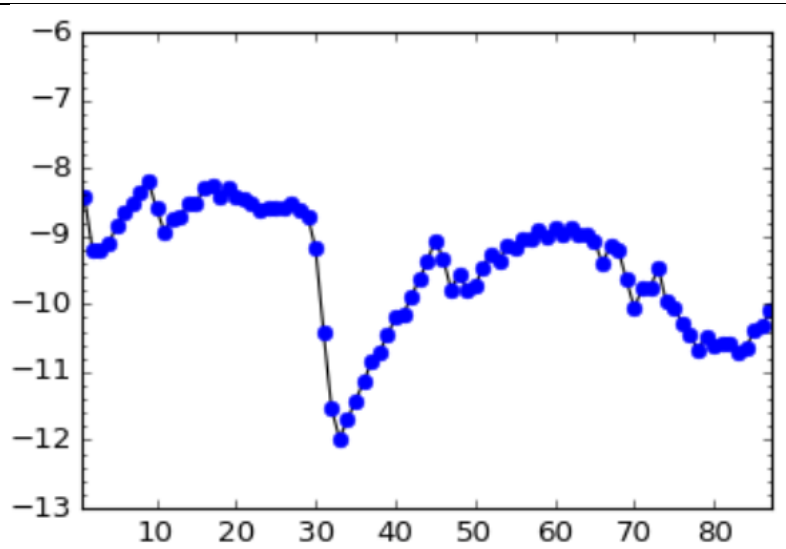
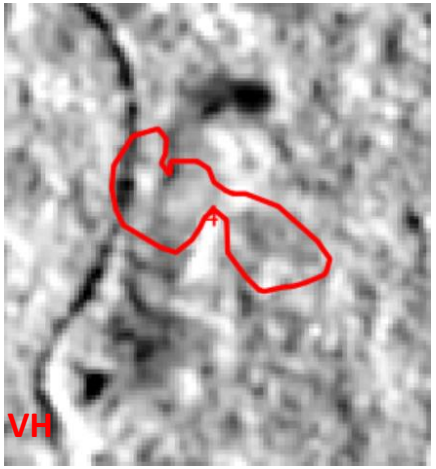
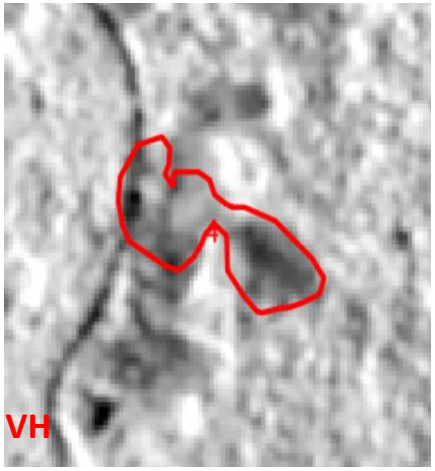
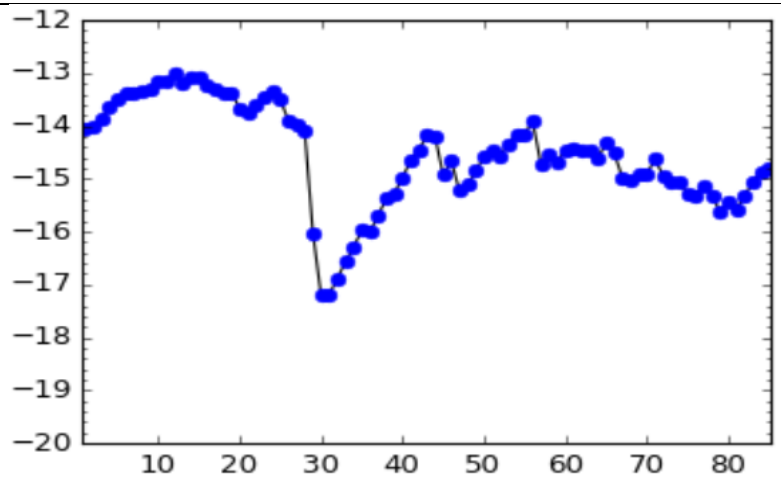
Figure 94: MDDM K pour les zones présentant des comportements suspects données par le tableau 54 et pour le site de test.

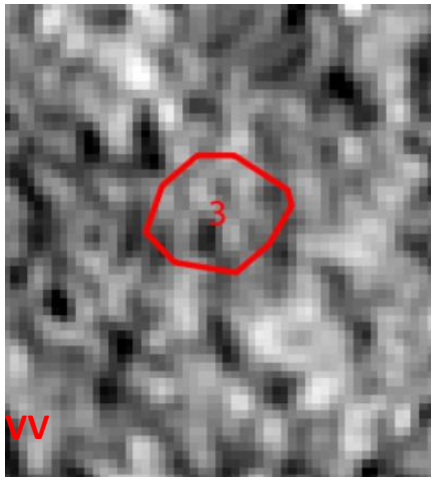
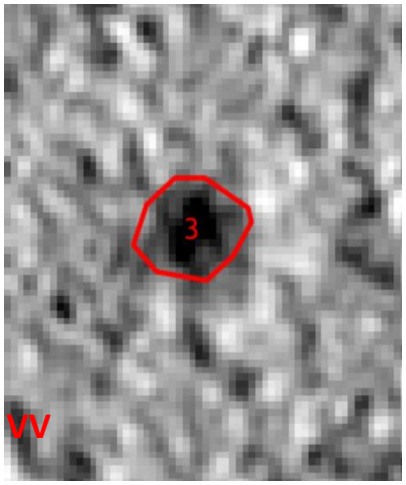
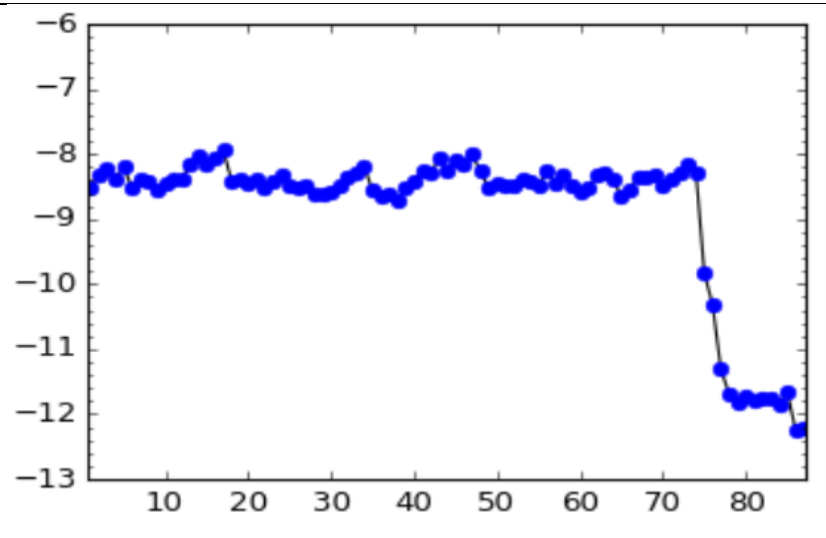
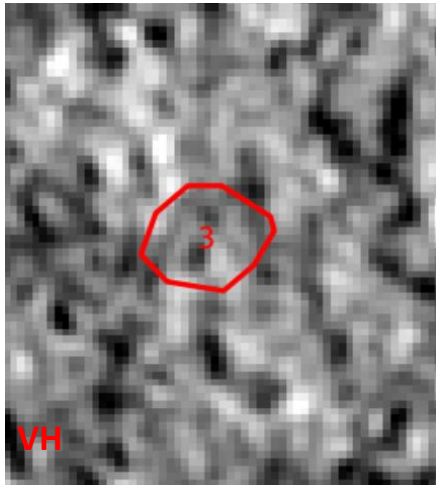
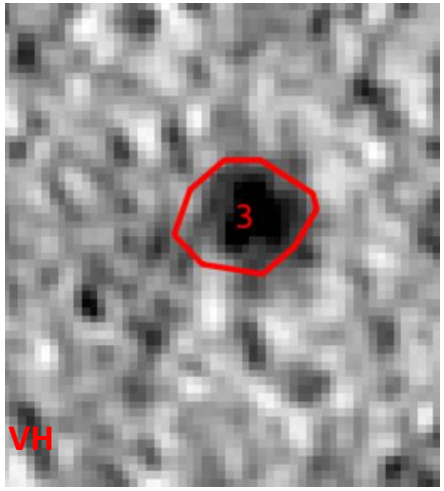
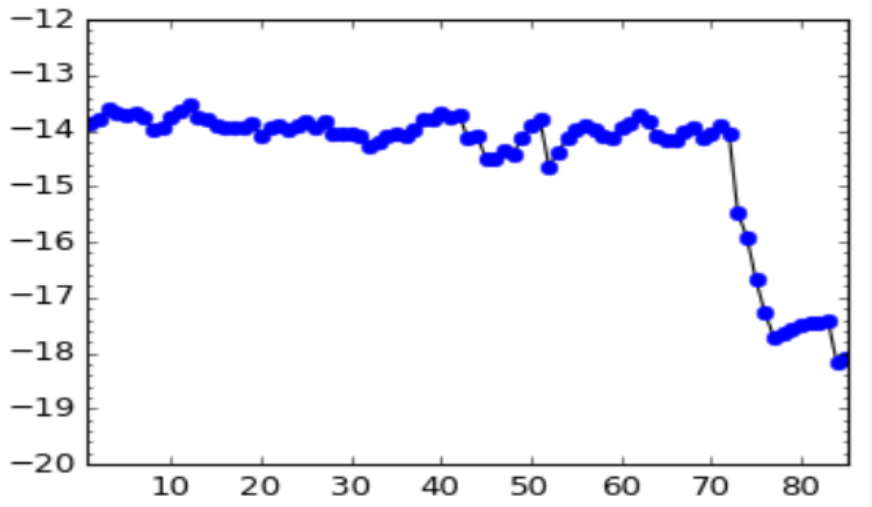
Le MDDM de l'ensemble du site de test est également donné à la figure 94 à des fins de comparaison: à cette échelle (plus de 108 pixels), ce MDDM est principalement dominé par les changements saisonniers. Ce MDDM montre par exemple que VH est plus sensible à la variabilité saisonnière que VV. En effet, VV discrimine moins les variations dans la végétation que VH.

Tableau 43 : Analyse des profils VV et VH de la série temporelle d'image S-1 pour les 4 cas de types de changements observés

N°	Date de début de la série temporelle: 2015-05-12	Date de fin de la série temporelle : 2017-12-03	Profil temporel des 87 images ayant servie à l'analyse : ***Cas de changements brusques avec variabilité saisonnière.***
Site01 : VV			
Site01 : VH			

	Date de début de la série temporelle: 2015-05-12	Date de fin de la série temporelle : 2017-12-03	Profil temporel de 87 images S-1 : ***Cas de changements progressifs avec presque aucune variabilité saisonnière visible.***
Site 02 VV			
Site 02 VH			

	Date de début de la série temporelle: 2015-05-12	Date de fin de la série temporelle : 2017-12-03	Profil temporel de 87 images S-1 : ***Cas de changements avec une variabilité saisonnière visible.***
Site 04 VV			
Site 04 VH			

	Date de début de la série temporelle: 2015-05-12	Date de fin de la série temporelle : 2017-12-03	Profil temporel de 87 images S-1 : ***Cas où il n'existe pas de saisonnalité visible.***
Site 03 VV			
Site 03 VH			

I.4. Conclusions

L’objectif de cette phase expérimentale est l’application de cette méthode sur les images Sentinel-1 en profitant de la haute fréquence d’acquisition du capteur.

Dans ce test nous avons proposé l’analyse d’image Radar Sentinel-1 à partir d’une fusion d’informations en deux étapes.

- La première étape consiste en une fusion d'ondelettes géométriques sur des comportements de conversion des données spatio-temporelles (variations totales en ondelettes élevées pouvant résulter de certains changements brusques ou effets saisonniers cumulatifs).
- La deuxième étape est une fusion des divergences spatiales multi-échelles d'ondelettes pour capturer les variations de texture dans le temps.

Le MDDM asymétrique proposait une matrice de conservation de la matrice unique, à la fois les variabilités VV et VH PolSAR.

Les resultats montrent que la methode permet de détecter les changements de tout type avec l’image de moyenne résolution (Sentinel-1). Certains changements / évolutions sont plus visibles sur VV ou VH alors que d'autres concernent les deux canaux (VV, VH).

II. Caractérisation détaillée des classes d'occupation du sol sur la plaine littorale de Kourou

Cette section est consacrée à l'exploration des images Sentinel-1 dans la discrimination à très grande échelle des types de classes d'occupation du sol. Cette discrimination fine est réalisée d'une part à travers le processus de photo-interprétation des images et d'autre part grâce à une classification SVM. La plaine littorale de Kourou est la zone test choisie pour ce travail. Ce choix est dicté d'abord par la diversité importante des strates d'occupation du sol et la disponibilité de bases de données sur ces strates. Ainsi, nous avons utilisé les bases de données suivantes:

- La Base de données cartographique de l'IGN, 1/50000 ;
- La Base de données des cartographies de l'occupation des sols 2001-2005-2008 de l'ONF, 1/50000 ;
- La Base de données topographiques de l'IGN avec des données à 1/50000.

Cette section est organisée en quatre parties :

- L'identification et la définition des critères d'interprétation et de discrimination des classes d'occupation du sol ;
- La définition des classes d'occupation du sol ;
- La démarche d'analyse et d'interprétation ;
- La présentation des résultats :
    - La comparaison des résultats de classification des images Sentinel-1 avec la base de données cartographiques de l'IGN ;
    - L'analyse fine de la limite de détection des strates d'occupation sur les images Sentinel-1.

II.1. Les critères d'interprétation et de discrimination des classes d'occupation de sol.

Les critères d'interprétation et de discrimination des classes d'occupation du sol que nous avons utilisés dans cette application sont regroupés en deux types :

- Les critères relatifs aux seuils de représentation.
- Les critères relatifs à la séparabilité.

II.1.1. les Critères relatifs aux seuils de représentations des classes

La représentation géographique ou spatiale des objets terrestres se fait sous trois formes :

- Sous forme de polygones ;
- Sous forme de lignes ;

- Sous forme de points.

Les seuils de représentations des classes d'occupation du sol sont respectivement fonction des surfaces des objets (seuils surfaciques), de la longueur des objets (seuils linéaires) et de la représentation des points (seuils ponctuels).

- ***Seuils de surface minimum :***

Le seuil de surface minimum est la surface minimale à partir de laquelle un objet ou classe sera distingué par rapport à un autre sur l'image satellitaire (Sentinel-1 dans notre cas) et représenté sur une carte.

- ***Seuils linéaires :***

Le seuil linéaire correspond à la largeur minimale pouvant être considérée pour la représentation des structures linaires (réseaux de transport, gestion de rétrécissements entre objets).

II.1.2. les Critères relatifs à la séparabilité des classes

- ***Analyse radiométrique :***
    - **<u>Réponse spectrale :</u>**
        - Bande C
    - **<u>Réponse polarimétrique</u>**
        - Polarisation HV
        - Polarisation VV
- ***Analyse de la texture (Granulométrie, rugosité) :***
    - Texture lisse
    - Texture granulométrique
    - Rugosité

II.2. Caractéristiques des strates d'occupation des sols Définition des classes d'occupation du sol

- Sans végétation
    - Surfaces anthropisées
        - Zones bâties :

Il s'agit de zones avec des constructions urbaines organisées ou diffuses.

- Zones non bâties :

Il s'agit des zones ayant subi des transformations de nature anthropique mais en restant non bâties. C'est le cas par exemple de zone de carrière.

- Surfaces naturelles :
    - Sols nus :

Il s’agit de zones sans couvert végétal ; c’est le cas par exemple des affleurements rocheux.



- Plages de sables

Ce sont les endroits du littoral occupés par la plage. On y trouve surtout les plages sableuses et dans certain cas une végétation herbacée basse et discontinue.





- Surfaces d’eau

Il s’agit de cours d’eau ou de rivières situés au niveau de la plaine du littoral de Kourou.



- Avec végétation
  - Végétation ligneuse
    - Formations arborées :
      - Forêts denses équatoriales

La forêt dense équatoriale occupe environ 90 % de la superficie de la Guyane française.





- Forêts Secondaires

La forêt secondaire correspond à la zone forestière ayant subi des transformations suite à des exploitations et dont le couvert s'est reconstitué.



- Mangrove

La mangrove ou forêt de palétuviers est une formation typique des milieux tropicaux saumâtres. C'est aussi le lieu de rencontre entre l'eau douce et l'océan. On trouve le long des côtes des mangroves jeunes qui colonisent les bancs de vases récents, participant ainsi à la progression de la mangrove vers la mer. Dans les zones d'érosion, on observe une dégradation de la mangrove.





- Formation arbustives et sous-arbrisseaux :

Il s'agit essentiellement de formation de savane. La savane est un espace ouvert, par opposition à la mangrove d'une part et aux forêts d'autre part (BOYE, 1962). Les savanes du littoral plus particulièrement se développent sur les sols pauvres où alternent inondation ou extrêmes sécheresses. Selon Cadamuro (CADAMURO et al, 1995), on distingue 4 types de savanes : la savane inondée, la savane inondable, la savane arbustive et la savane sèche.

- Savanes inondées

La savane inondée se développe dans les zones inondées en permanence sous une hauteur d'eau inférieure à 1 m. Elle est parfois en contact avec les formations de mangrove.



- Savanes sèches

Elle se développe dans des zones bien drainées. Il s'agit du dernier stade herbacé avant l'installation de la forêt. Ce type de savane est fonction des conditions hydriques du milieu.



- Savanes arbustives

Elle est caractérisée par un peuplement d'arbustes parsemés



- Savanes inondables

Ce type de savane est inondé pendant une partie de l'année essentiellement pendant les saisons des pluies



II.3. Démarche d'analyse et d'interprétation :

II.3.1. Extraction automatique des classes sur l'image Sentinel-1 par classification.

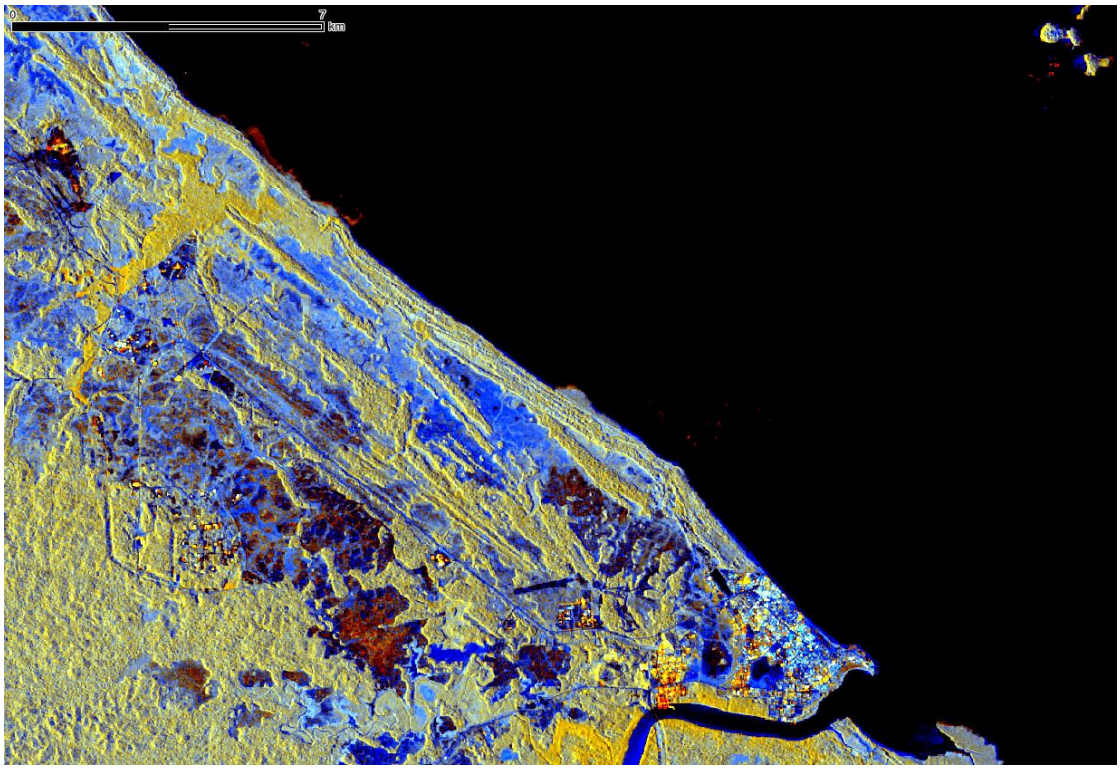


Figure 95: Illustration de la moyenne temporelle d'image Sentinel-1 (2017-01-01:2017-12-03); (Composition colorée **Rouge=VVdB** ; **Vert =VHdB**; Bleu= VHdB-VVdB)

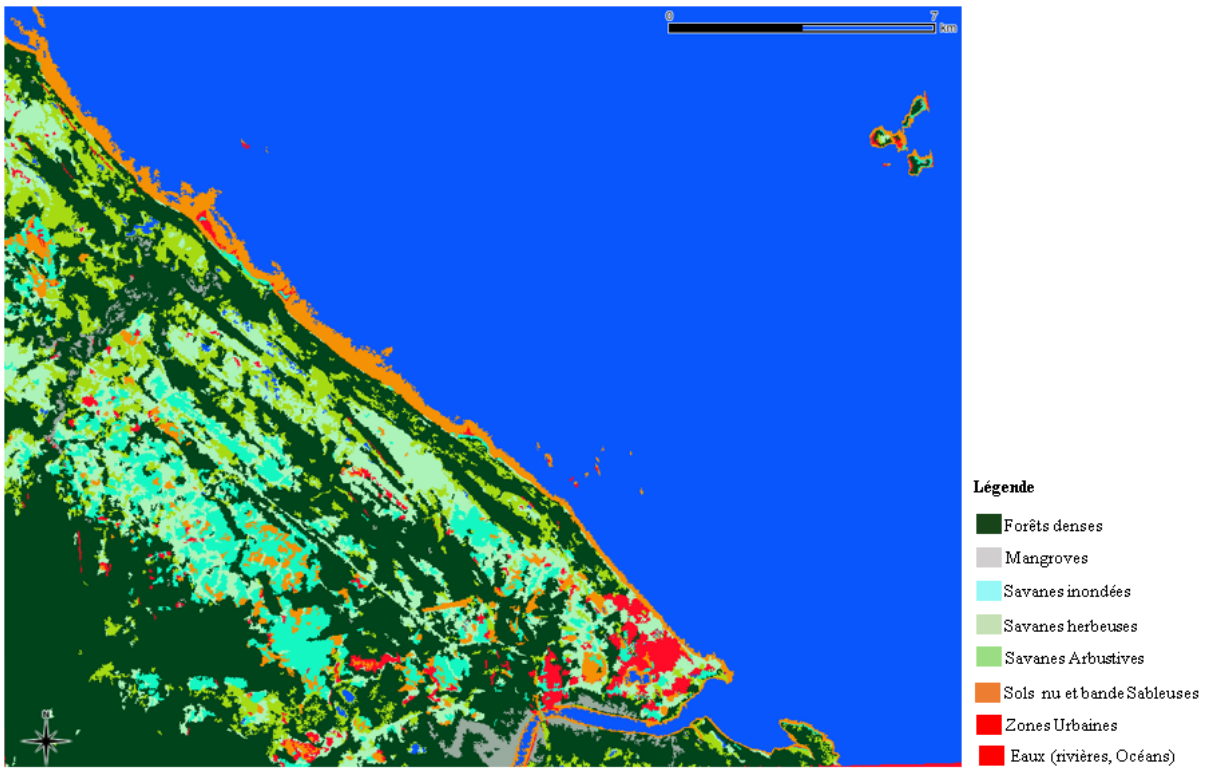


Figure 96: Résultat de la classification SVM sur une moyenne 53 scènes Sentinel-1 en bande C. Les résultats de la classification ont été tamisés à 0,5ha.

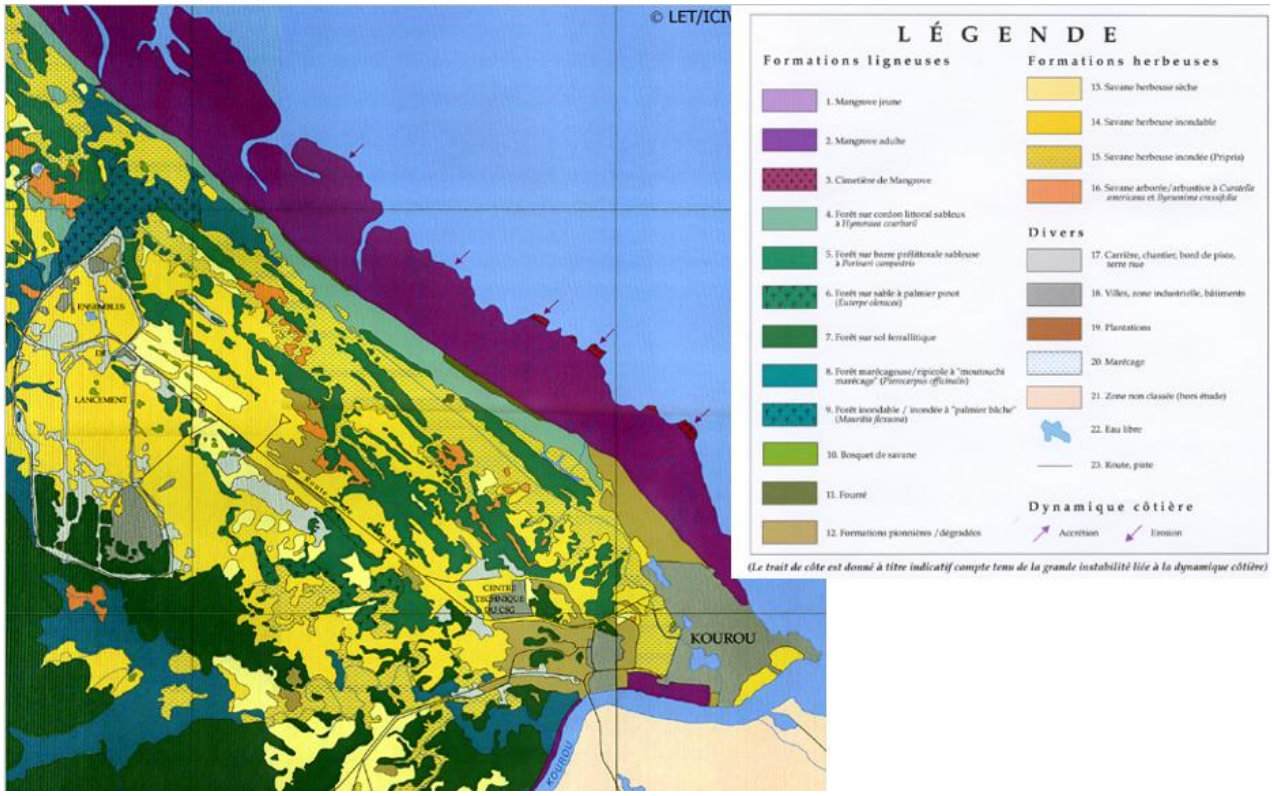


Figure 97: Carte de références du laboratoire de l'Ecologie terrestre en 1995 au 1/50000

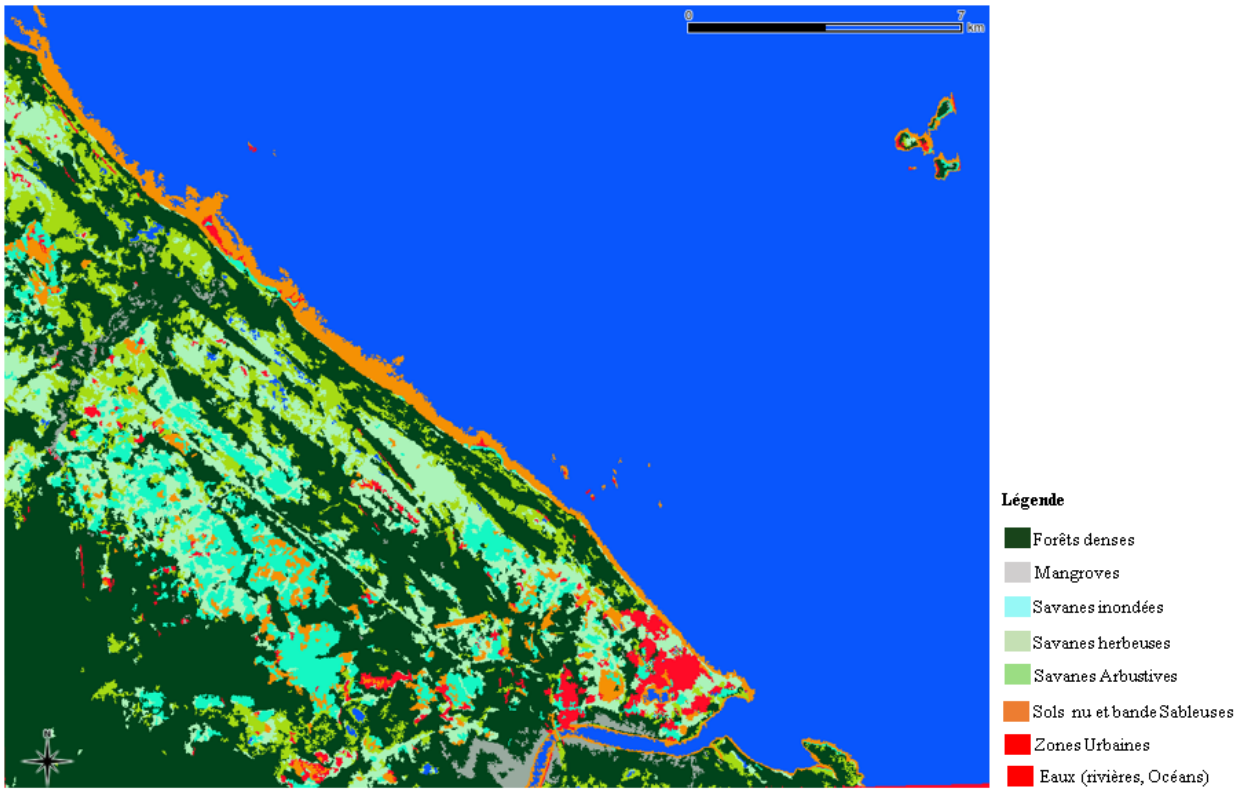
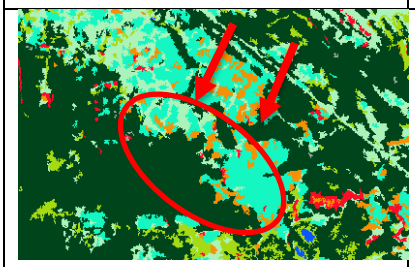
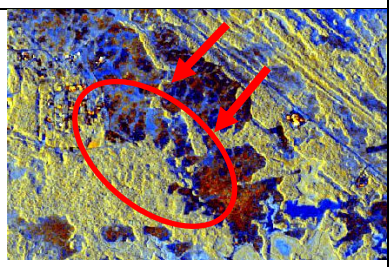


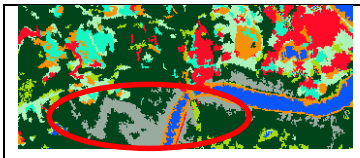
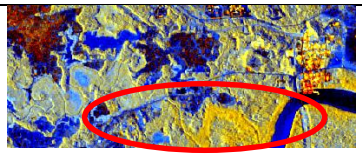
Figure 98: Résultat de la classification SVM sur une moyenne 53 scènes Sentinel-1 en bande C. Les résultats de la classification ont été tamisés à 0,5ha.

La comparaison du résultat de la classification avec la carte de référence permet de remarquer :

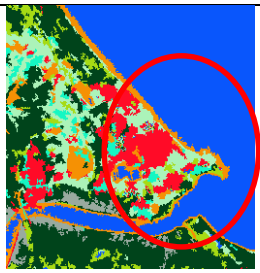
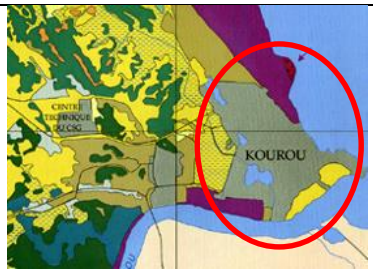
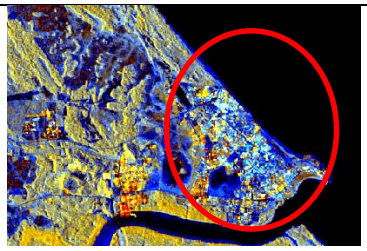
- Une bonne discrimination de la classe de forêt :

Résultat classificationSVM	Carte de reference	Moyenne d'images S1
		

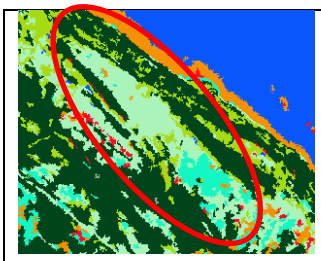
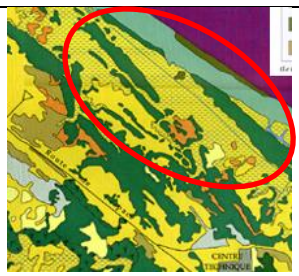
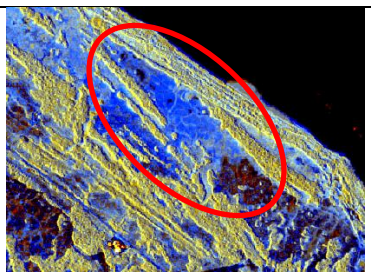
- Une bonne extraction de la classe mangrove :

- Une sous discrimination des zones urbaine : (zone urbaine de Kourou)

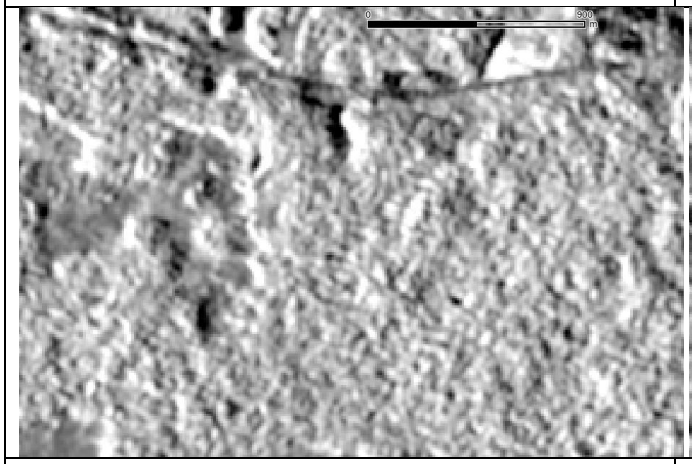
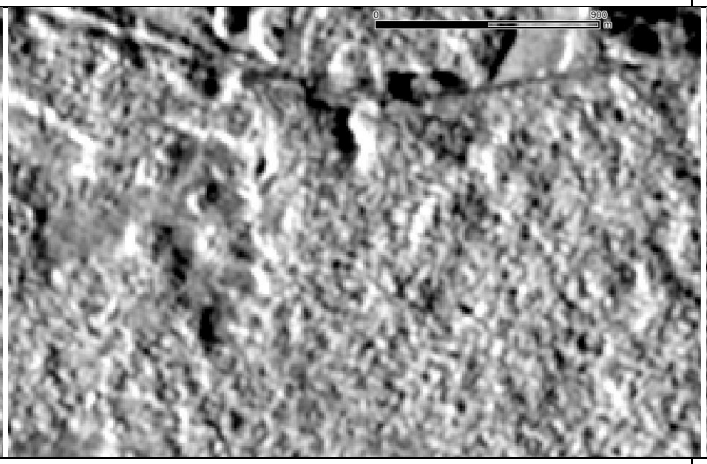
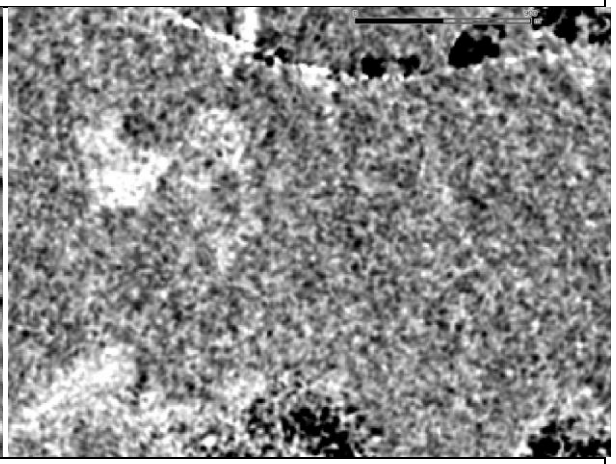
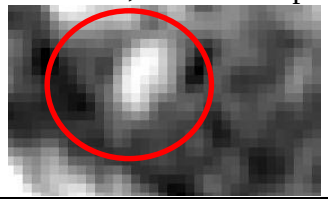
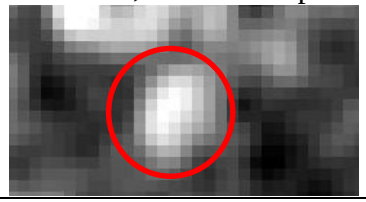
		

- Zone de discrimination de Savane.

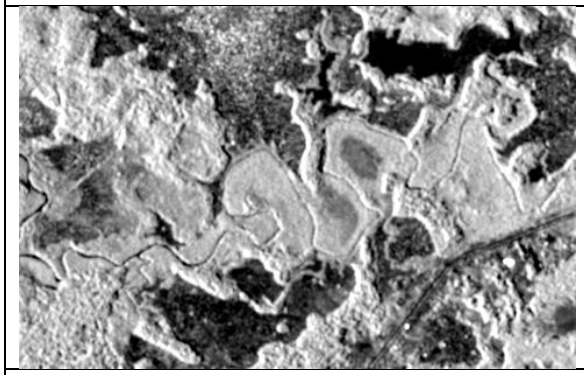
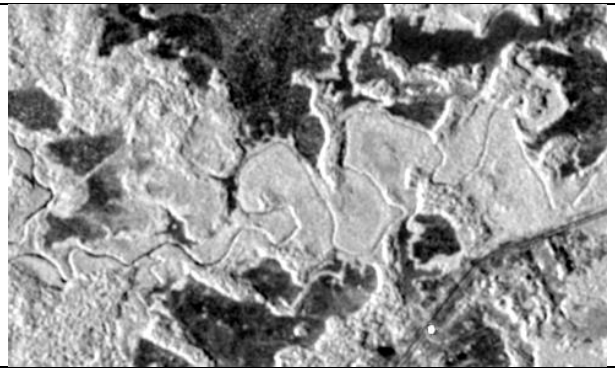
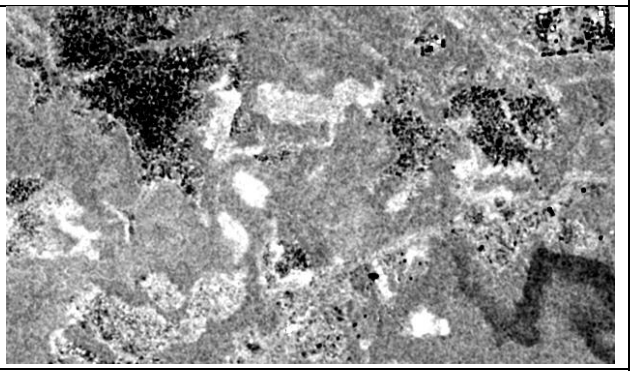
II.3.2. Approche d'analyse et de photo-interprétation.

- Classe de forêt dense équatoriale:

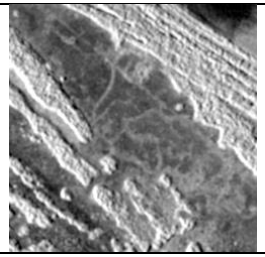
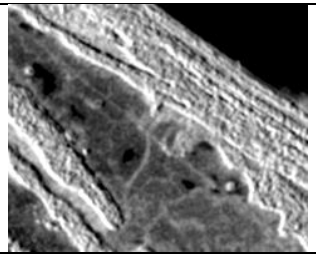
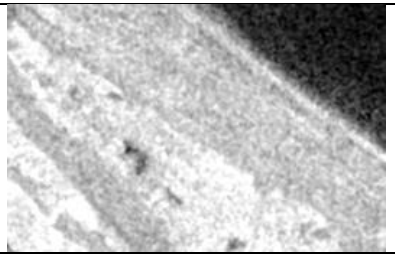
Bande VV en db	Bande VH en db	Bande VH-VV en db
		
Valeur radiométrique moyenne : - 9,6 db	Valeur radiométrique moyenne :- 13,2 db	Valeur radiométrique moyenne : - 3,6 db
Seuils de surface : > 0,2 ha soit 20 pixel S-1 	Seuils de surface : > 0,2 ha soit 20 pixel S-1 	Seuils de surface : non visible à 0,2ha.
Type texture: Rugueuses	Type texture: Rugueuses	Type texture: Rugueuses

En mode photo interprétation il est possible de distinguer et de numériser les surfaces de forêt à partir de 0,2ha avec une texture rugueuses sur les images Sentinel-1 avec le filtre de Quegan. On observe les mêmes niveaux de détail avec la moyenne de 87 images Sentinel-1.

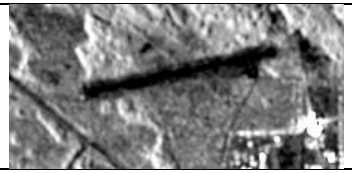
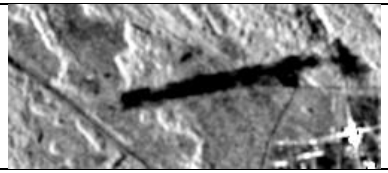
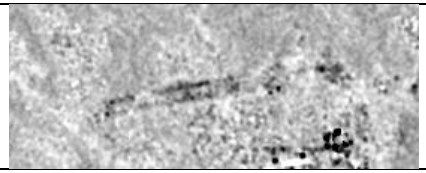
- Classe mangrove :

Bande VV en db	Bande VH en db	Bande VH-VV en db
		
Valeur radiométrique moyenne : - 8,2 db	Valeur radiométrique moyenne :- 13,5 db	Valeur radiométrique moyenne : - 5,3 db
Seuils de surface : > 0,2 ha soit 20 pixel S-1	Seuils de surface : > 0,2 ha soit 20 pixel S-1	Seuils de surface : non visible à 0,2ha.
Type texture: lisse	Type texture: lisse	Type texture: Rugueuses

- Classe Savanes :

Bande VV en db	Bande VH en db	Bande VH-VV en db
		
Valeur radiométrique moyenne : - 10,26 db	Valeur radiométrique moyenne :- 14,87 db	Valeur radiométrique moyenne : - 4,6 db
Seuils de surface : > 0,1 ha soit 10 pixel S-1	Seuils de surface : > 0,1 ha soit 10 pixel S-1	Seuils de surface : non visible à 0,1ha.

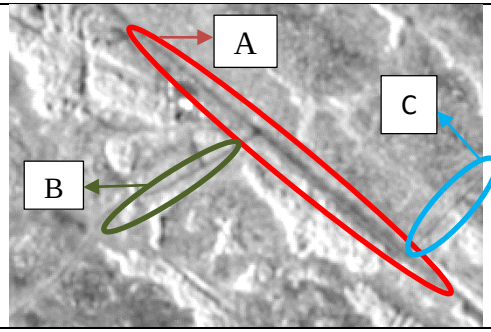
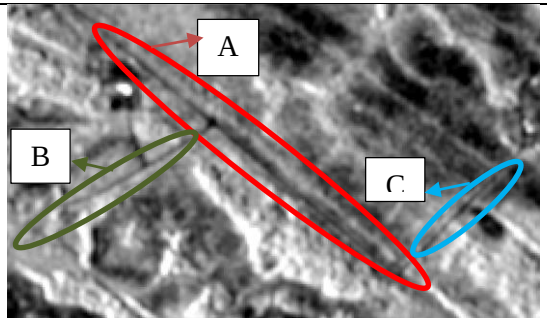
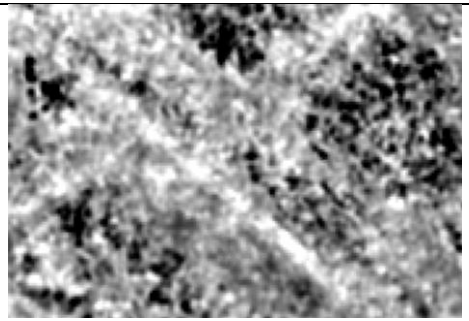
- Classe aéroport :

Bande VV en db	Bande VH en db	Bande VH-VV en db
		
Valeur radiométrique moyenne : - 14,2 db	Valeur radiométrique moyenne :- 20,2 db	Valeur radiométrique moyenne : - 6,0 db
Longueur : 1,3 km Largeur : 60 m	Longueur : 1,3 km Largeur : 60 m	Longueur : 1,3 km Largeur : 60 m
Type texture: lisse	Type texture: lisse	Type texture: Rugueuses

- Classe zone urbaine :

Bande VV en db	Bande VH en db	Bande VH-VV en db
		
Valeur radiométrique moyenne : - 1,2 db	Valeur radiométrique moyenne :- 11,7 db	Valeur radiométrique moyenne : - 12,9 db
Seuils de surface : > 0,1 ha soit 10 pixel S-1	Seuils de surface : > 0,1 ha soit 10 pixel S-1	Seuils de surface: 0,1ha.

- Classe routes :

Bande VV en db	Bande VH en db	Bande VH-VV en db
		
Largeur A: 30 m ; Largeur B: 20 Largeur C : 10 m	Largeur A: 30 m ; Largeur B: 20 Largeur C : 10 m	Sur le résultat de la différence de la polarisation VH-VV les routes ne sont pas visibles.

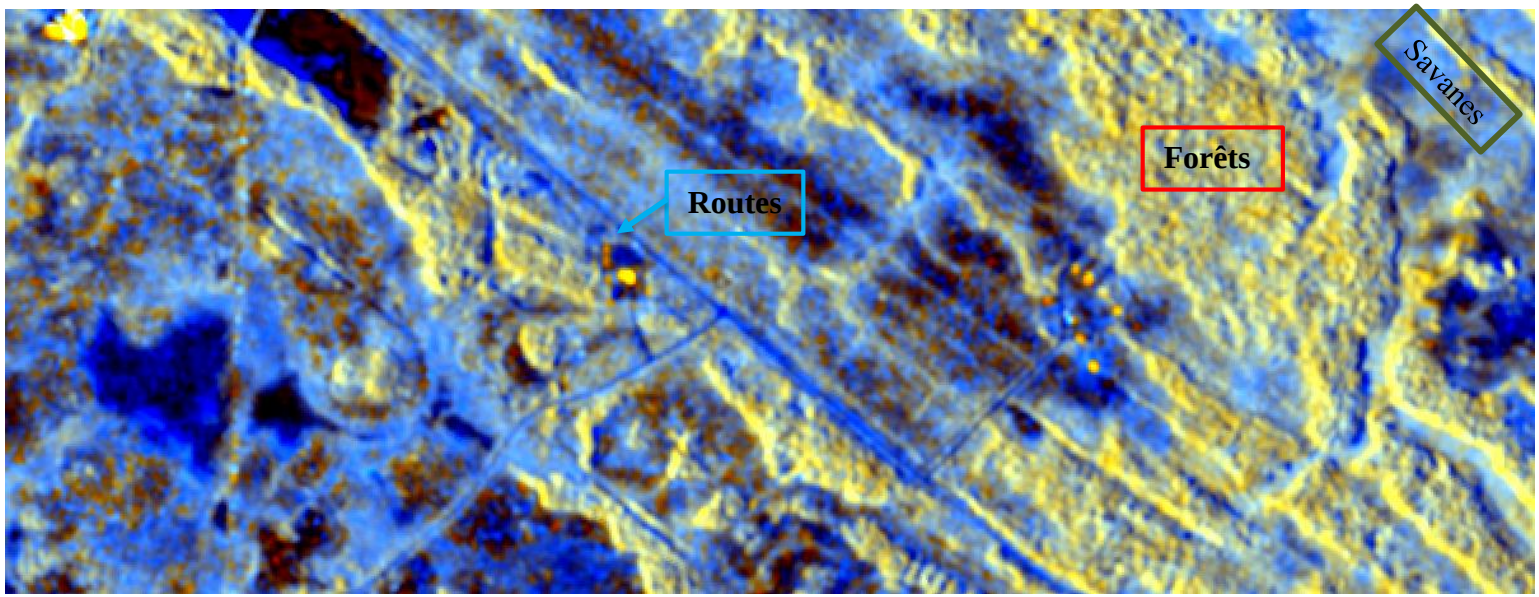


Figure 99: illustrant la route, la forêt et la savane sur Sentinel-1 (composition colorée Rouge = db(VV), Vert V = db(VH), Bleu = db(VH)-db(VV)

II.4. Conclusion :

L'analyse visuelle des images Sentinel-1 sur la plaine du littorale de Kourou permet de mettre en évidence les classes d'occupation du sol indiquées dans la carte de référence de l'IGN. Cette analyse confirme les resultats obtenus par Niamien (Niamien, 2013), dans le cadre de ces recherches qu'il a mené sur l'évaluation du potentiel des données radar multi-paramètre pour la cartographie en milieu tropical : applications en Guyane française et en côte d'ivoire.

- ***Pour la classe forêt*** *:* on a remarqué que la moyenne de la radiométrie en bande C – VV est de - 9,6 db et en bande C - VH la moyenne est de -13,2 db. La surface minimale discriminable est supérieure ou égale à 0,2ha soit 20 pixels de résolution de 10 m.
  Plus globalement pour tous les objets surfaciques (classe d'occupation du sol : savanes, forêts, retenue d'eau, zones agricoles) la surface minimale détectable avec les images Sentinel-1 à 10 m de résolution est de 0,2 ha (2000 m^2 soit 20 pixel).
- ***Pour les routes :*** Pour les objets linéaires comme les routes nous avons remarqué que :
  - Les routes dont la largeur est inferieure ou égale à 10 m (1 pixel) sont difficilement observables sans zoom avec les outils de traitement.
  - Les routes dont la largeur est supérieure à 20 m (2 pixel) sont observables et faciles à extraire par numérisation.

La largeur minimale des objets linéaires est donc de 20 m soit 2 pixel sur les images Sentinel.

Partie II :

Chapitre VII : Suivi des écosystèmes fragiles et vulnérables aux changements climatiques de la province de Monte Cristi en République Dominicaine.

Introduction

I. Analyse du paysage de la province de Monte Cristi

II. Cartographie de l'occupation des sols

II.1. Approche par les images optiques - Sentinel-2

II.2. Approche par les images radar – Sentinel-1

II.3. Approche par combinaison d'images optiques/radar (Sentinel-2/Sentinel-1)

II.4. Discussion des résultats

III. Analyse historique des écosystèmes fragiles et vulnérables

III.1. Analyse historique relative aux écosystèmes humides

III.2. Analyse historique relative à l'écosystème des forêts

IV. Conclusion

Introduction

Ce chapitre va être consacré aux résultats obtenus sur le site de la province de Monté Cristi. Ces résultats concernent le suivi temporel des écosystèmes fragiles et vulnérables (forêts et mangroves) de la province. Ainsi dans un premier temps, nous allons présenter les classes ou strates d'occupation des sols identifiées lors de la mission de terrain. Dans un deuxième temps, nous présenterons les résultats des cartographies réalisées, après classification, sur les images satellitaires. Les classifications sont relatives aux images Sentinel-2 et Sentinel-1 traitées séparément puis en les combinant. Dans un troisième temps nous présenterons les résultats de l'analyse diachronique réalisée uniquement sur les classes d'occupation fragiles et vulnérables.

I. Analyse du paysage et identification des strates d'occupation de la province de Monte Cristi lors de mission de terrain

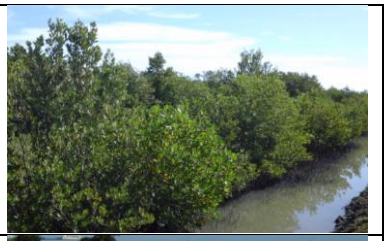
Une mission de terrain a été réalisée du 10 au 22 juin 2018 pour analyser le paysage de la province de monté Cristi en vue d'identifier les types ou classes d'occupation des sols.

A l'issue de cette analyse du paysage, nous avons identifié au total 18 classes d'occupation. Le tableau 44 liste et illustre ces classes.

Tableau 44: Les Classes d'occupation des sols identifiées lors de la mission de terrain

Nom	Code	Description	Illustrations
Série 1 : Forêts denses de plaine	Fdp	Il s'agit de zones couvertes par des végétations denses, avec des essences forestières dont des hauteurs dépassent les 15 m.	
Série 2 : Forêts denses de montagne	Fdm	Il s'agit de zones couvertes par des végétations denses, avec des essences forestières dont les hauteurs dépassent les 15 m. Ces formations sont situées dans les zones montagneuses (la distintion avec la forêt denses de plaine et les forêts denses de montagne est faite sur la base de l'altitude et sur l'observation terrain).	
Série 3 : Plantation de pin	Pp	Zones couvertes par des plantations de pin (*Pinus sp*).	

Série 4 : Forêts denses d'acacia	Fda	Il s'agit de formations denses *d'acacias sp*. Zone densément couverte d'essences épineuses. La hauteur des essences est supérieure à 5 m. le couvert de la canopée est supérieure à 80%	
Série 5 : Forêts claires d'acacia	Fca	Il s'agit de formation *d'acacias sp* dont le couvert de la canopée varie de 30 à 60%. La hauteur des essences épineuses est supérieure à 5 m.	
Série 6 : Végétation arbustive	Va	Il s'agit de zones couvertes de végétations arbustives.	
Série 7 : Riziculture	Agri_R	Cultures de riz (actuelles ou en cours) et/ou partiellement inondées.	
Série 8 : Bananeraies	Agri_B	Cultures de banane ou zone anciennement cultivée en banane.	
Série 9 : Zone mixte Riziculture Bananeraies	Agri_R_B	Culture composée de mélange de riz et de banane.	
Série 10 : Autres cultures	Ag_Autre	Zone cultivée avec des cultures comme le tabac et le melon, haricot (identifié sur le terrain).	
Série 11 : Pâturage (fermes "assemblant"	Pâ	Il s'agit de zones de pâturage pour le bétail.	

Série 12 : Zone de mangrove	Zm	Végétations particulières qui se développent avec des racines et une partie du tronc dans l'eau de mer. Il s'agit de zones présentant diversité biologique importante.	
Série 13 : Marais salant	Mar_Sal	Espace dédié à la production de sel	
Série 14 : Cours d'eau	Ce	Eau libre : cours des rivières, des fleuves, océan.	
Série 15 : Sol Nu	Sn	Espaces sans végétation, carrières.	
Série 16 : Urbain	Urb	Il s'agit de zones de bâtis organisées ou non. Zones d'habitation avec des logements ou des structures industrielles.	
Série17 : Zone Humide	Zh	Zones couvertes d'eau et de végétation herbacée. Elles sont particulièrement observables en saison des pluies	
Série 18 : Végétations herbacées	Vh	Zones couvertes de graminées ou de végétations herbacées	

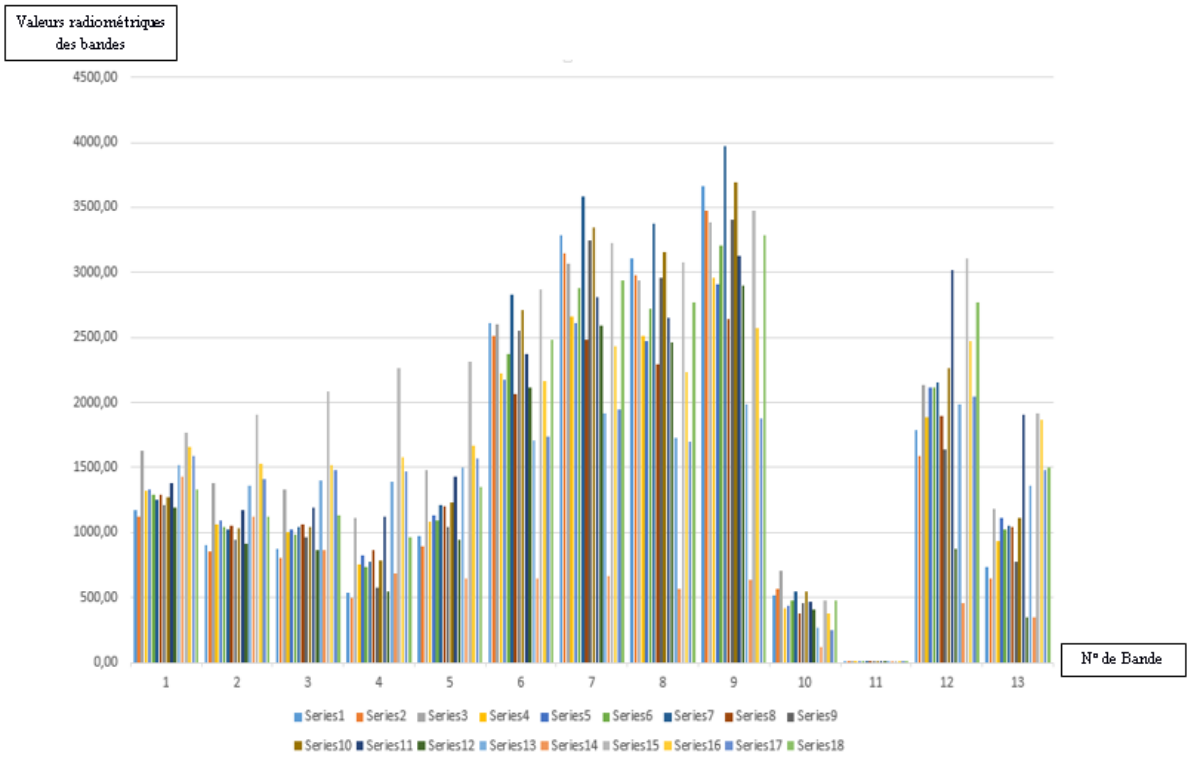


Figure 100: Valeurs radiométriques moyennes des ROI des classes d'occupations du sol pour chaque bande Sentinel-2

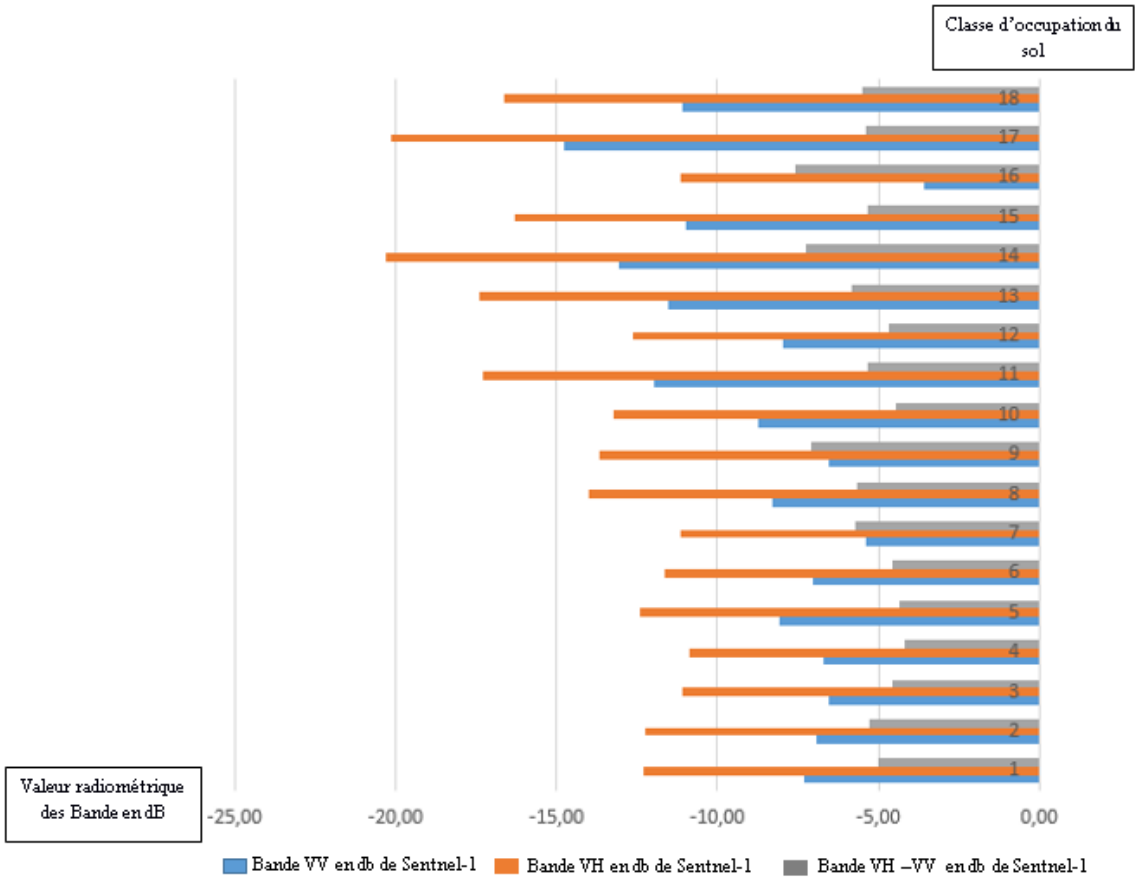


Figure 101: Moyenne des valeurs radiométriques des bandes VV, VH et de la différence VH, VV en decibel d'image sentinel-1 pour chaque classe d'occupation du sol sur le site de Monté Cristi

II. Cartographie d'occupation des sols

II.1. Analyse d'image optique – Sentinel-2

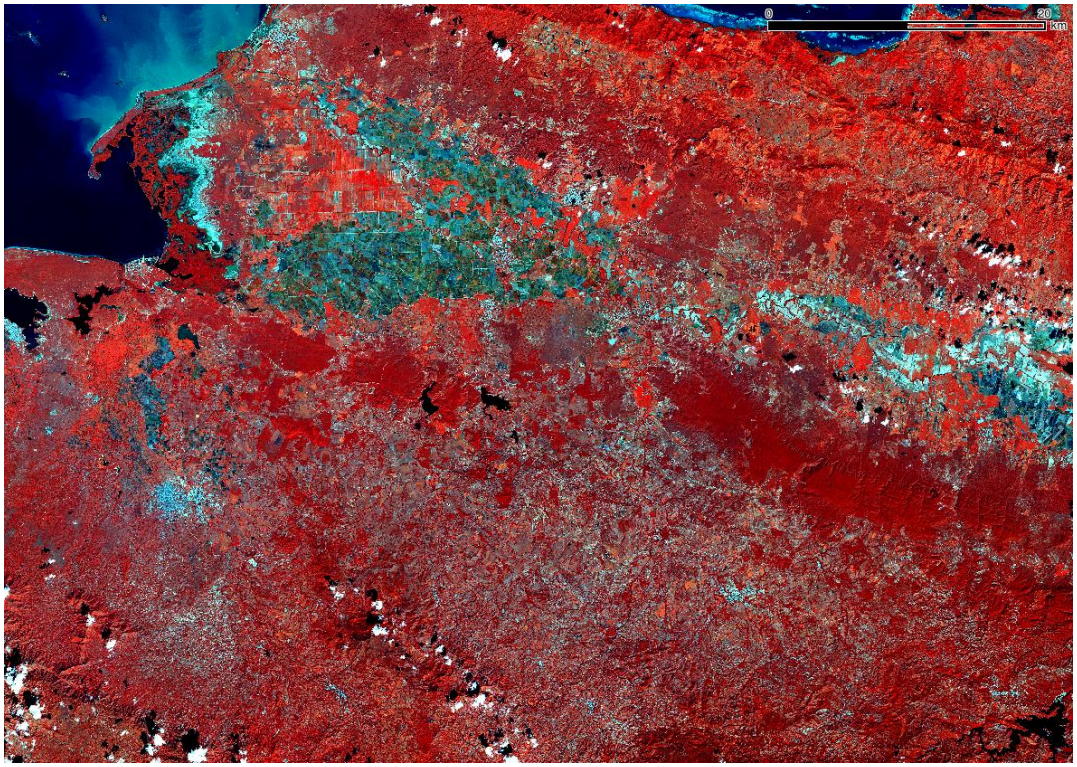


Figure 102: illustration de l'image Sentinel-2 utilisée pour la classification

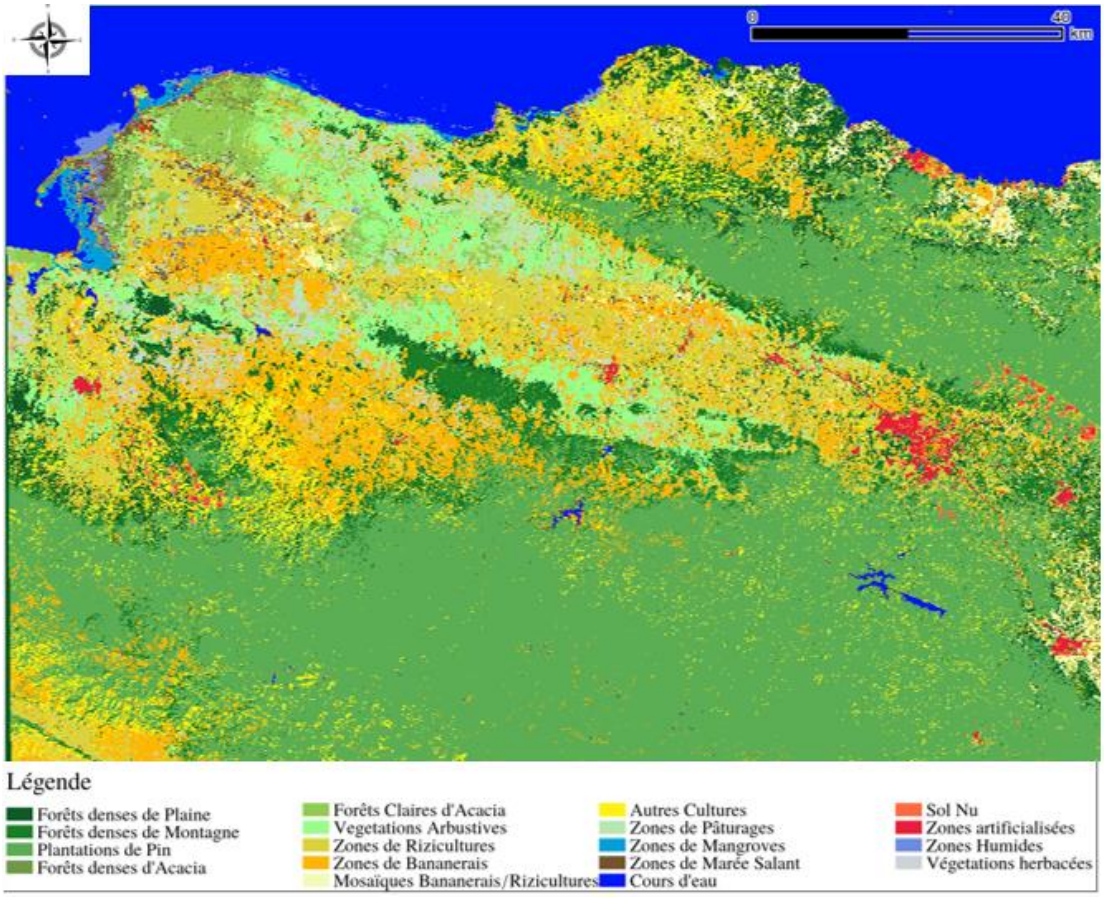


Figure 103: Cartographie d'occupation des sols de la zone de Monté Cristi obtenue par classification SVM à partir Sentinel-2A

La figure 103 illustre le résultat de la classification sur les images Sentinel-2. La matrice de confusion issue de la classification indique une précision globale de 89%. La précision producteur presque de toutes les classes d'occupation du sol est supérieure à 80% (seul la classe ''Riziculture'' présente une précision producteur de 72%). La classe ''Riziculture'' se confond avec la classe marais salant, ce qui explique que la précision utilisateur de cette dernière tombe à 78,8%. Le tableau 45 (matrice de confusion) montre des confusions entre des classes dont les signatures spectrales sont très proches. C'est le cas :

- Des classes forêts denses de plaines et les forêts denses de montagne ;
- De la classe marais salant qui se confond avec les classes cours d'eau, la classe zone humide et mangrove.
- La classe mosaïque riziculture/bananerais qui se confond avec les classes bananeraies et riziculture.

Une des pistes permettant d'améliorer les statistiques de validation de la classification consiste à regrouper les classes très similaires entre elles dans une phase de post-traitement.

Tableau 45: Matrice de confusion de la classification sur Sentinel-2

Classe	Fdp	Fdm	pp	Fda	Fca	Va	Agri_B	Agri_R	Agri_R_B	Agri_Autre	Pât	Zone_M	Mar_Sal	Cours_Eau	Sol_Nu	Urb	Zone_Hum	Veg_Herb	Total	PA (%)
Fdp	859	71	16	1	0	16	29	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000	85,9
Fdm	71	832	67	2	0	2	24	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000	83,2
PP	12	74	908	0	0	0	5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000	90,8
Fda	2	0	0	846	58	93	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000	84,6
Fca	0	0	0	23	939	12	1	5	0	2	14	0	3	0	0	0	0	1	1000	93,9
Va	25	2	0	42	43	875	4	1	2	6	0	0	0	0	0	0	0	0	1000	87,5
Agri_B	37	6	3	1	2	11	835	8	38	31	18	0	4	0	3	0	0	3	1000	83,5
Agri_R	9	1	2	4	12	17	41	720	25	7	46	0	46	1	1	24	10	34	1000	72,0
Agri_R_B	11	11	0	1	0	13	73	15	871	5	0	0	0	0	0	0	0	0	1000	87,1
Agri_Autre	0	0	0	3	3	2	29	3	3	815	4	0	1	0	1	0	0	0	864	94,3
Pât	0	0	0	0	8	0	1	7	0	0	965	0	5	0	6	0	1	7	1000	96,5
Zone_M	1	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	995	0	0	0	0	0	0	1000	99,5
Mar_Sal	0	0	0	1	3	1	1	29	0	0	3	0	859	0	27	36	38	2	1000	85,9
Cours_Eau	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	995	0	0	3	0	1000	99,5
Sol_Nu	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	2	0	44	0	640	3	0	0	694	92,2
Urb	0	0	0	5	1	0	0	27	0	0	1	0	61	0	55	838	8	4	1000	83,8
Zone_Hum	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	14	0	59	4	3	4	883	3	1000	88,3
Veg_Herb	0	0	0	0	2	0	0	6	0	1	25	0	8	0	0	3	4	951	1000	95,1
Total	1027	999	997	929	1071	1042	1043	857	950	870	1092	995	1090	1000	736	908	947	1005	17558	
UA (%)	83,6	83,3	91,1	91,1	87,7	84	80,1	84	91,7	93,7	88,4	100	78,8	99,5	87	92,3	93,2	94,6	OA (%) = 89,09	

II.2. Analyse d'image radar – Sentinel-1

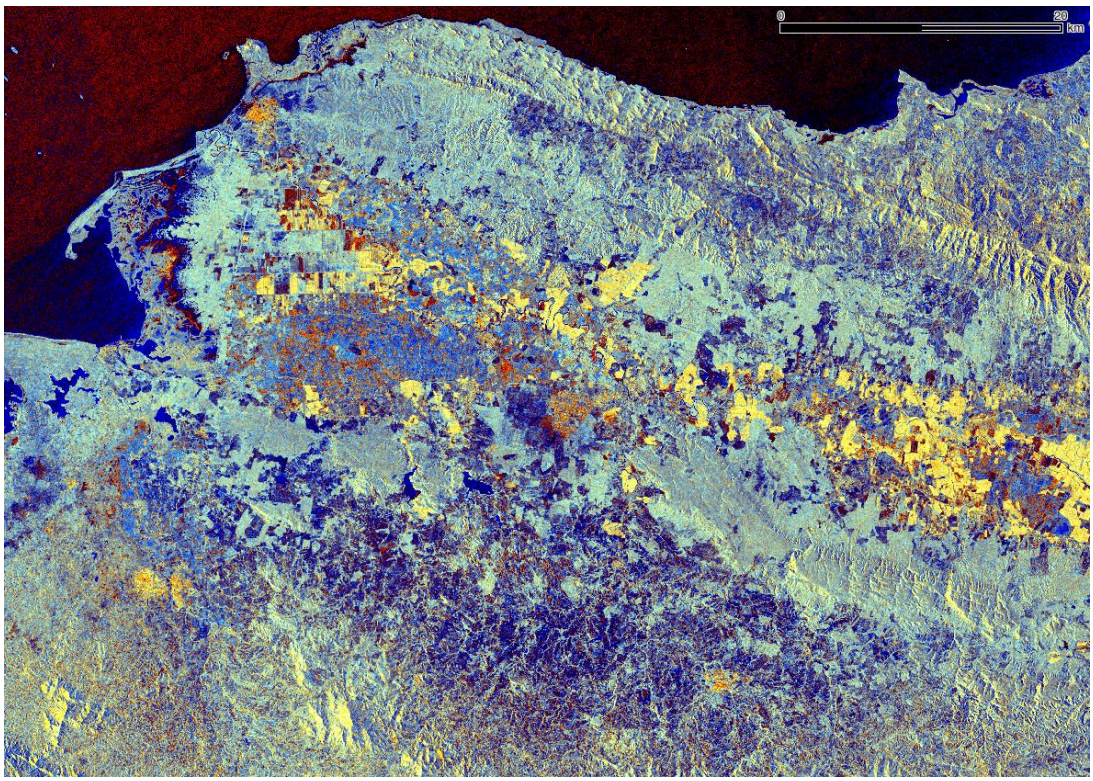


Figure 104: Illustration d'une image S-1 filtré ayant servis à la classification

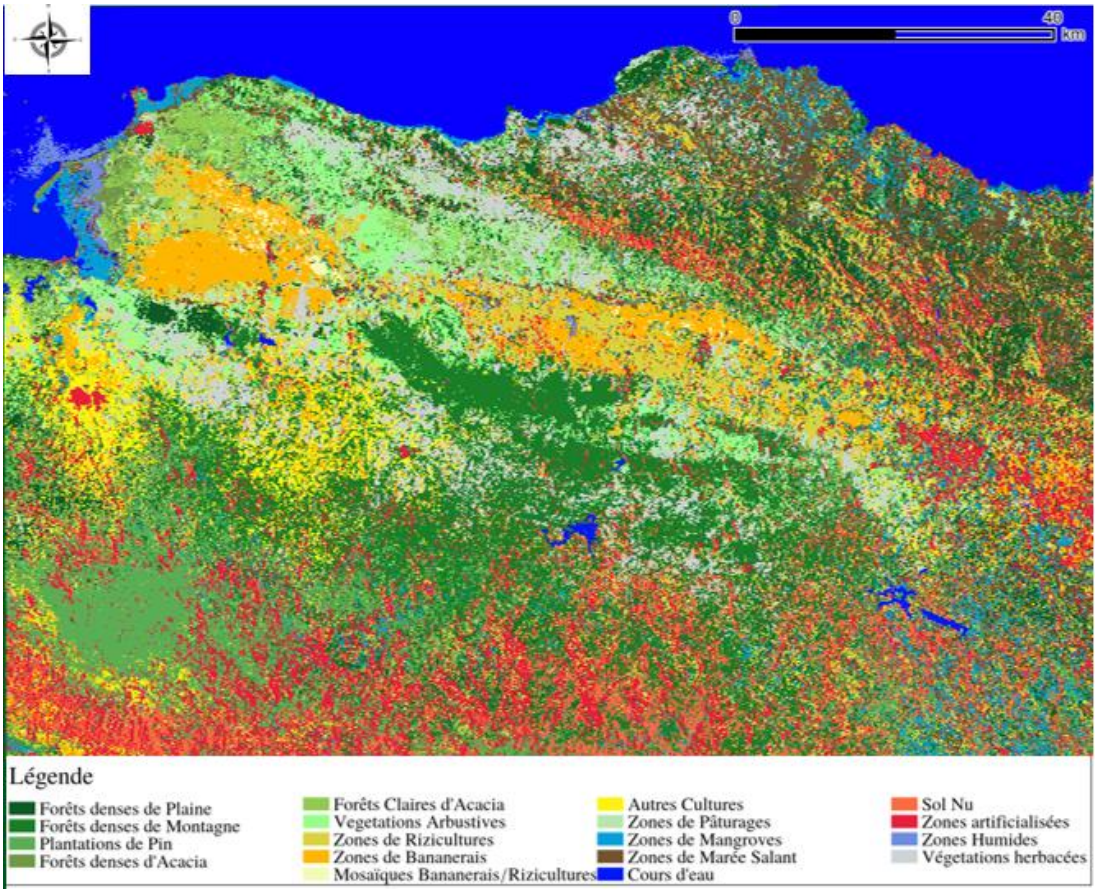


Figure 105: Cartographie d'occupation des sols de la zone de Monté Cristi obtenu par classification SVM à partir de 43 scènes S-1

La figure 105 illustre le résultat de la classification sur une série de 43 images Sentinel-1. La matrice de confusion issue de la classification (Tableau 46) indique une précision globale de 83%. Contrairement à la classification obtenue sur le Sentinel-2, on remarque que la classe de forêt dense de plaine à une précision producteur de 76,8 %. Cette classe présente de fortes confusions avec les autres classes de végétation notamment les forêts denses de montages, les forêts d'acacia, la végétation arborée. Les classes liées à l'eau (cour d'eau, zone de mangrove zone humide et zone de marée salant) ont des précisions producteurs assez élevées pouvant atteindre plus de 90%. En comparant visuellement la classification obtenue avec les images de base, on peut noter une surestimation des zones artificialisées et des zones de sol nu. Cette analyse visuelle est confirmée par les statistiques de précision producteur qui sont respectivement de 79 et 64%. Afin d'extraire la meilleure contribution des images Sentinel-1 et Sentinel-2 nous allons produire une classification combinant les données des deux capteurs Sentinel-1 et Sentinel-2.

Tableau 46: Matrice de confusion de la classification sur 43 scènes Sentinel-1 (2015-2018)

Classe	Fdp	Fdm	pp	Fda	Fca	Va	Agri_B	Agri_R	Agri_R_B	Agri_Autre	Pât	Zone_M	Maré_Sal	Cours_Eau	Sol_Nu	Urb	Zone_Hum	Veg_Herb	Totall	PA
Fdp	768	31	39	39	19	53	15	1	1	0	0	19	6	0	3	6	0	0	1000	76,8
Fdm	12	807	20	13	0	48	12	0	2	8	0	5	13	0	21	36	0	3	1000	80,7
PP	29	71	797	13	3	28	13	0	0	5	1	12	5	0	6	17	0	0	1000	79,7
Fda	40	15	7	832	36	48	2	0	0	1	0	14	0	0	4	1	0	0	1000	83,2
Fca	72	2	6	82	721	54	9	3	0	6	14	16	8	0	1	0	0	6	1000	72,1
Va	109	20	10	77	51	722	7	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	1000	72,2
Agri_B	50	7	11	14	65	13	690	39	7	16	21	9	6	0	1	48	1	2	1000	69
Agri_R	11	6	3	0	4	0	28	797	36	23	33	2	8	0	3	4	2	40	1000	79,7
Agri_R_B	2	4	4	0	0	0	48	24	912	0	0	1	0	0	0	5	0	0	1000	91,2
Agri_Autre	5	1	1	1	8	3	0	5	0	834	0	2	0	0	0	0	0	4	864	96,5
Pât	0	0	1	0	2	0	0	3	0	8	958	1	4	0	0	0	0	23	1000	95,8
Zone_M	7	18	26	47	4	8	8	0	0	1	0	869	6	0	3	3	0	0	1000	86,9
Maré_Sal	2	1	5	2	16	0	0	7	0	2	26	11	843	2	27	0	51	5	1000	84,3
Cours_Eau	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	995	0	0	1	0	1000	99,5
Sol_Nu	11	22	25	9	15	10	10	6	0	8	8	32	48	5	445	13	12	7	686	64,9
Urb	24	24	22	3	7	10	66	25	0	4	1	5	6	0	4	795	1	3	1000	79,5
Zone_Hum	0	1	1	0	0	0	0	0	1	2	2	0	43	2	12	0	936	0	1000	93,6
Veg_Herb	5	3	0	0	4	0	0	9	0	3	20	0	1	0	0	0	0	955	1000	95,5
Total	1147	1033	978	1132	955	997	908	920	960	923	1084	1000	999	1004	530	928	1004	1048	17550	
UA	67	78,1	81,5	73,5	75,5	72,4	76	86,6	95,0	90,4	88,4	87	84,4	99,1	84,	85,7	93,2	91,1	OA (%) = 83,4%	

II.3. Analyse de la combinaison d'image optiques/radar (Sentinel-2/Sentinel-1)

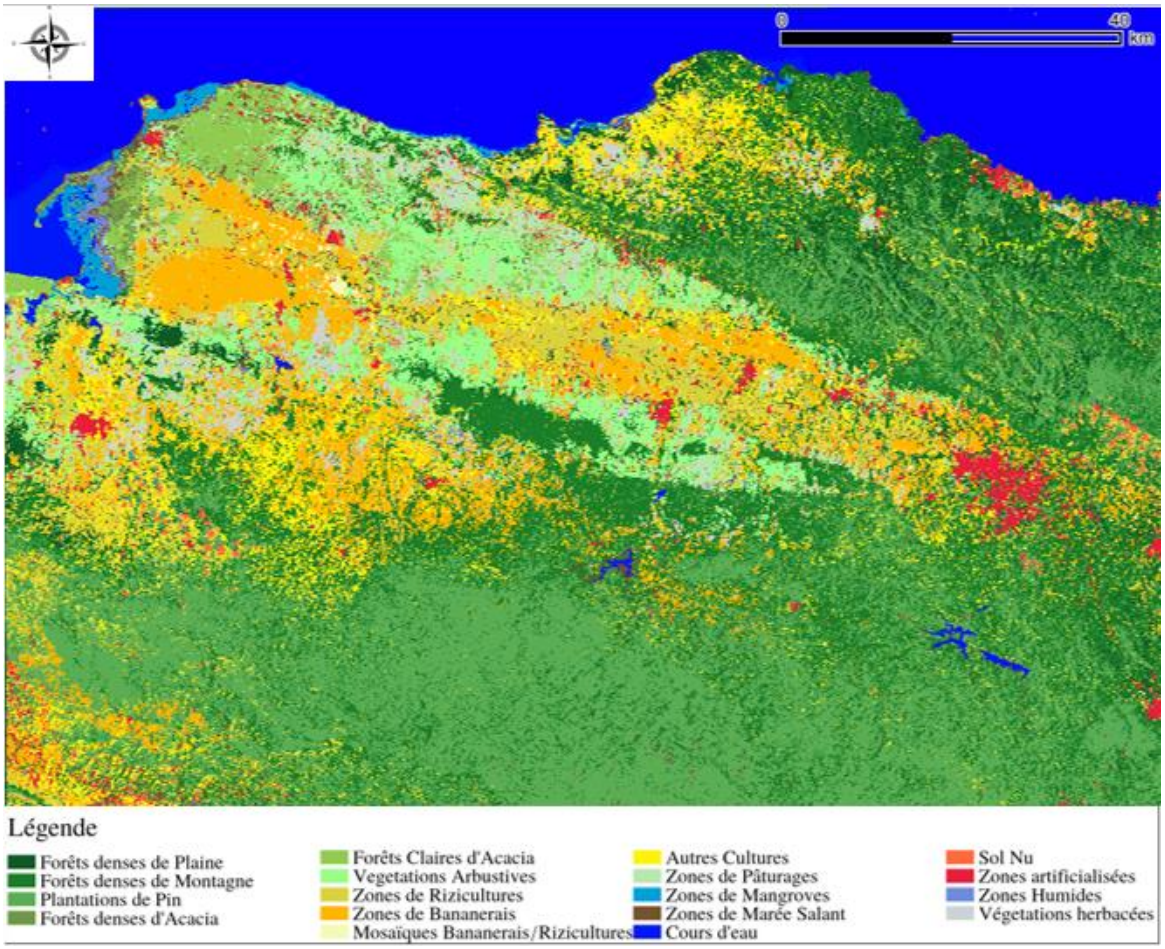


Figure 106: Cartographie d'occupation des sols de la zone de Monté Cristi obtenue par classification SVM des 43 scènes S-1+ S2.

La figure 106 illustre le résultat de la classification sur la combinaison d'image Sentinel-1 et Sentinel-2. La matrice de confusion issue de la classification (Tableau 47) indique une précision globale de 93%. Cette précision globale est supérieure à celle obtenue sur l'image à partir de l'image Sentinel-2 de 4% et celle obtenue à partir de l'image sur Sentinel-1 de 10%. Les classes de ''forêts denses de plaine'', de ''plantation de pin'', de ''forêts claires et denses d'acacia'' ont des précisions utilisateurs supérieures à 90%. Cela correspond à une bonne discrimination de ces classes. Les classes mangroves, cours d'eau et zones humides ont des précisions producteurs qui avoisine les 100%, cette valeur est déjà obtenue avec sentinel-2 seule pour la mangrove.

Ces résultats démontrent la complémentarité des capteurs Sentinel-1 et Sentinel-2 dans la discrimination des classes d'occupation des sols.

Dans la suite une analyse diachronique sera basée sur le regroupement des différentes classes de forêts en une seule classe et le regroupement des classes mangroves et zones humides en une seule classe.



Figure 107: illustration en plaine résolution de l'image Setinel-2

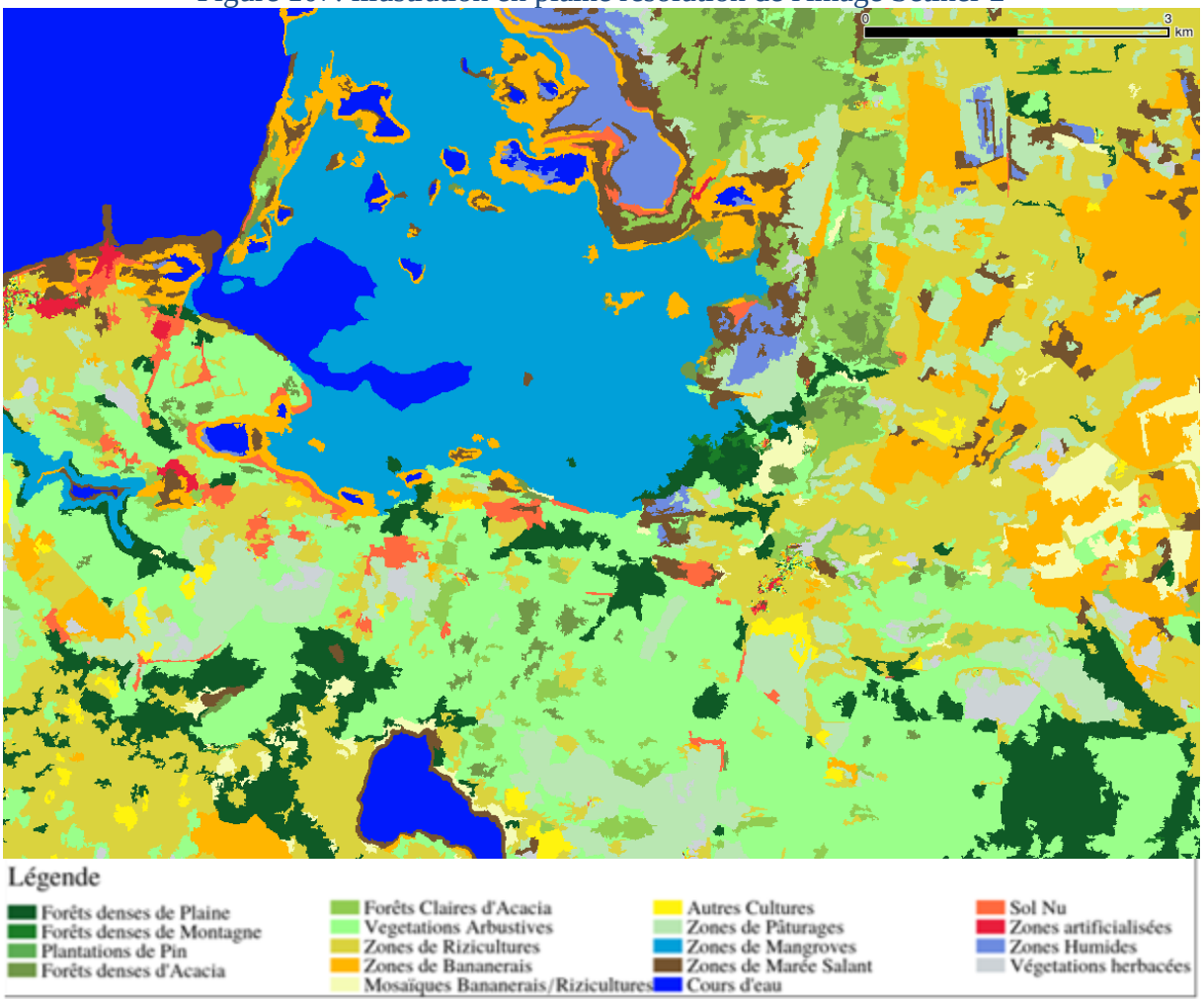


Figure 108: Illustration de la classification sur l'image Sentinel-2 en résolution initiale

Tableau 47: Matrice de confusion de la classification sur 43 scènes Sentinel-1+ Sentinel-2

Classe	Fdp	Fdm	pp	Fda	Fca	Va	Agri_B	Agri_R	Agri_R_B	Agri_Autre	Pât	Zone_M	Maré_Sal	Cours_Eau	Sol_Nu	Urb	Zone_Hum	Veg_Herb	Total	PA (%)
Fdp	859	67	23	1	0	17	29	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	1000	85,9
Fdm	19	880	72	1	0	10	10	0	1	6	0	0	0	0	0	1	0	0	1000	88
PP	11	56	926	0	0	1	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1000	92,6
Fda	3	7	2	874	33	73	1	1	0	0	4	0	0	0	0	1	0	1	1000	87,4
Fca	0	1	0	13	950	11	0	3	0	0	9	0	2	0	0	2	0	9	1000	95
Va	21	3	0	43	21	901	2	1	0	6	0	0	0	0	0	2	0	0	1000	90,1
Agri_B	10	3	1	0	1	2	957	3	3	10	4	0	0	0	4	2	0	0	1000	95,7
Agri_R	6	6	0	0	6	6	30	850	22	13	29	0	9	0	5	6	0	12	1000	85
Agri_R_B	2	2	0	0	0	5	79	21	889	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1000	88,9
Agri_Autre	1	0	0	0	0	1	4	2	0	856	0	0	0	0	0	0	0	0	864	99,1
Pât	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	979	0	7	0	10	0	0	1	1000	97,9
Zone_M	0	0	4	0	0	0	1	0	0	0	0	995	0	0	0	0	0	0	1000	99,5
Maré_Sal	0	0	0	0	9	4	0	3	0	0	8	0	912	0	27	2	34	1	1000	91,2
Cours_Eau	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	999	0	0	1	0	1000	99,9
Sol_Nu	0	0	0	0	0	1	3	4	0	6	0	0	38	0	625	9	0	0	686	91,1
Urb	0	3	0	2	18	0	1	6	0	0	0	0	13	0	17	939	0	1	1000	93,9
Zone_Hum	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	9	0	36	0	2	0	947	0	1000	94,7
Veg_Herb	0	0	0	0	4	0	0	5	0	0	10	0	2	0	0	0	0	979	1000	97,9
Total	932	1028	1028	934	1043	1032	1120	906	915	906	1052	995	1020	999	690	964	982	1004	17550	
UA (%)	92,2	85,6	90,1	93,6	91,1	87,3	85,4	93,8	97,2	94,5	93,1	100	89,4	100	90,6	97,4	96,4	97,5	OA (%) = 93	

II.4. Discussion des résultats statistiques

Le tableau 48 présente la synthèse des statistiques de classification grâce au calcul de F-score qui est une moyenne des indicateurs des précisions producteur et utilisateur. L'analyse de la contribution de chaque capteur à la discrimination des classes d'occupation du sol va être réalisée uniquement sur l'indicateur F-score. Le Tableau 48 présente la différence entre les F-Score des classifications Sentinel-2 et Sentinel-1.

Tableau 48: Synthèse des statistiques de classification avec le calcul du F-Score

Sentinel-2					**Sentinel-1**					**Sentinel-1+Sentinel-2**				
Classes	UA(%)	PA (%)	F-Score (%)	PG (%)	Classes	UA(%)	PA (%)	F-Score (%)	PG (%)	Classes	UA(%)	PA (%)	F-Score (%)	PG (%)
Fdp	83,6	85,9	84,75		Fdp	67	76,8	71,9		Fdp	92,2	85,9	89,05	
Fdm	83,3	83,2	83,25		Fdm	78,1	80,7	79,4		Fdm	85,6	88	86,8	
PP	91,1	90,8	90,95		PP	81,5	79,7	80,6		PP	90	92,6	91,3	
Fda	91,1	84,6	87,85		Fda	73,5	83,2	78,35		Fda	93,6	87,4	90,5	
Fca	88	93,9	90,95		Fca	75,5	72,1	73,8		Fca	91,1	95	93,05	
Va	84	87,5	85,75		Va	72	72,2	72,1		Va	87,3	90,1	88,7	
Agri_B	80,1	83,5	81,8		Agri_B	76	69	72,5		Agri_B	85,4	95,7	90,55	
Agri_R	84	72	78		Agri_R	86,6	79,7	83,15		Agri_R	94	85	89,5	
Agri_R_B	91,7	87,1	89,4	89,1	Agri_R_B	95	91,2	93,1	83,8	Agri_R_B	97,2	88,9	93,05	93,1
Agri_Autre	93,7	94,3	94		Agri_Autre	90,4	96,5	93,45		Agri_Autre	94,5	99,1	96,8	
Pât	88,4	96,5	92,45		Pât	88,4	95,8	92,1		Pât	93,1	97,9	95,5	
Zone_M	100	99,5	99,75		Zone_M	87	86,9	86,95		Zone_M	100	99,5	99,75	
Maré_Sal	78,8	85,9	82,35		Maré_Sal	84,4	84,3	84,35		Maré_Sal	89,4	91,2	90,3	
Cours_Eau	99,5	99,5	99,5		Cours_Eau	99,1	99,5	99,3		Cours_Eau	100	99,9	99,95	
Sol_Nu	87	92,2	89,6		Sol_Nu	84	64,9	74,45		Sol_Nu	90,6	91,1	90,85	
Urb	92,3	83,8	88,05		Urb	85,7	79,5	82,6		Urb	97,4	93,9	95,65	
Zone_Hum	93,2	88,3	90,75		Zone_Hum	93,2	93,6	93,4		Zone_Hum	96,4	94,7	95,55	
Veg_Herb	94,6	95,1	94,85		Veg_Herb	91,1	95,5	93,3		Veg_Herb	97,5	97,9	97,7	

Tableau 49: Différence entre les F-scores de la classification Sentinel-2 et Sentinel-1

Classes	F-Score (S-2)	F-Score (S-1)	(F-Score (S-2))-(F-Score (S-1))
Fdp	84,75	71,9	12,85
Fdm	83,25	79,4	3,85
PP	90,95	80,6	10,35
Fda	87,85	78,35	9,5
Fca	90,95	73,8	17,15
Va	85,75	72,1	13,65
Agri_B	81,8	72,5	9,3
Zone_M	99,75	86,95	12,8
Sol_Nu	89,6	74,45	15,15
Urb	88,05	82,6	5,45
Agri_R	**78**	**83,15**	**-5,15**
Agri_R_B	**89,4**	**93,1**	**-3,7**
Marré_Sal	**82,35**	**84,35**	**-2**
Zone_Hum	**90,75**	**93,4**	**-2,65**
Agri_Autre	**94**	**93,45**	**0,55**
Pât	**92,45**	**92,1**	**0,35**
Cours_Eau	**99,5**	**99,3**	**0,2**
Veg_Herb	**94,85**	**93,3**	**1,55**

Les classes dont le pouvoir de discrimination est élevé avec Sentinel-2

Les classes dont le pouvoir de discrimination est fort avec Sentinel-1

Les classes de pouvoir de discrimination identique entre Sentinel-1 et Sentinel-2

L'analyse du tableau 49 permet de regrouper les 18 classes en trois catégories :

- *Les classes dont le pouvoir de discrimination est élevé avec Sentinel-2 :* il s'agit des classes de forêts denses de plaine, de forêts denses de montagne, de plantations de pin, de forêts denses d'acacia, de forêts claires d'acacia, de végétations arborées/arbustives, de bananerais, de mangroves et de sol nu.
- *Les classes dont le pouvoir de discrimination est fort avec Sentinel-1 :* il s'agit des classes rizicultures, de mosaïques rizicultures bananerais, de marais salant et de zone humide.
- *Les classes de pouvoir de discrimination identique entre Sentinel-1 et Sentinel-2 :* classes pâturages et savanes herbeuses, autres zones agricoles, cours d'eau.

En observant ces trois groupes, il est possible de supposer que les formations végétales avec une densité importante de biomasse sont mieux discriminées grâce aux capteurs Sentinel-2. En plus il est connu que le capteur radar Sentinel-1 sature lorsque la quantité de biomasse est supérieure à 50 tonnes de biomasse/ha (Mermoz et Le Toan, 2016). Les classes dont l'humidité du sol est importante sont mieux discriminées par les images Sentinel-1. Ainsi du fait de sa forte sensibilité à l'eau libre, le capteur Sentinel-1 les discrimine plus facilement. On retrouve ainsi les contributions de chaque capteur Sentinel-1 et Sentinel-2 dans la classification issue de la fusion des deux capteurs.

Tableau 50: Analyse de F-scores de la fusion Sentinel-1/Sentinel-2 par rapport au deux capteurs séparées

Classes	F-Score (S-2) - A -	F-Score (S-1) - B -	F-Score (S-2) + (S-1) - C -	A - C	B - C
Fdp	84,75	71,9	89,05	-4,3	-17,15
Fdm	83,25	79,4	86,8	-3,55	-7,4
PP	90,95	80,6	91,3	-0,35	-10,7
Fda	87,85	78,35	90,5	-2,65	-12,15
Fca	90,95	73,8	93,05	-2,1	-19,25
Va	85,75	72,1	88,7	-2,95	-16,6
Agri_B	81,8	72,5	90,55	-8,75	-18,05
Agri_R	78	83,15	89,5	-11,5	-6,35
Agri_R_B	89,4	93,1	93,05	-3,65	0,05
Agri_Autre	94	93,45	96,8	-2,8	-3,35
Pât	92,45	92,1	95,5	-3,05	-3,4
Zone_M	99,75	86,95	99,75	0	-12,8
Maré_Sal	82,35	84,35	90,3	-7,95	-5,95
Cours_Eau	99,5	99,3	99,95	-0,45	-0,65
Sol_Nu	89,6	74,45	90,85	-1,25	-16,4
Urb	88,05	82,6	95,65	-7,6	-13,05
Zone_Hum	90,75	93,4	95,55	-4,8	-2,15
Veg_Herb	94,85	93,3	97,7	-2,85	-4,4

III. Analyse historique des écosystèmes fragiles et vulnérables

Une analyse diachronique ou historique est réalisée sur deux écosystèmes fragiles :

- Ecosystème forestier ;
- Ecosystème humide.

Cette analyse est réalisée avec la méthode de détection de la déforestation décrite dans la partie III.1 du chapitre III.

Les zones de changement détecté ont été validées lors d'une mission de contrôle sur le terrain du 24 au 30 septembre

III.1. Analyse historique relative aux écosystèmes humides

L'analyse historique est réalisée sur le regroupement des classes des mangroves et de zones humides appelées *écosystèmes humides.* Ces deux classes ont été regroupées car elles présentent des caractéristiques biologiques similaires et sont sujettes au même type de vulnérabilité vis-à-vis des changements climatiques et des pressions anthropiques. La figure 109 présente la cartographie binaire (*écosystèmes humides* / *écosystèmes non humides*) de la province.



Figure 109: Carte binaire écosystèmes humides / écosystèmes non humides de la province de Monté Cristi établie à partir de regroupement evoqué précedement

D’après cette cartographie binaire, les écosystèmes humides représentent une surface de 11200 ha soit 6 % de la surface totale de la province (188600 ha). Cet écosystème se trouve au niveau de la côte atlantique de la province.

L’analyse historique (diachronique entre 2015 et 2018) est réalisée sur la série temporelle Sentinel-1 du 04 mai 2015 au 25 mars 2018 avec une approche de détection de changement par seuillage développé par Lardeux et al, 2018. La figure 110 présente les zones de changement détectées entre 2015 et 2018 au niveau des écosystèmes humides.

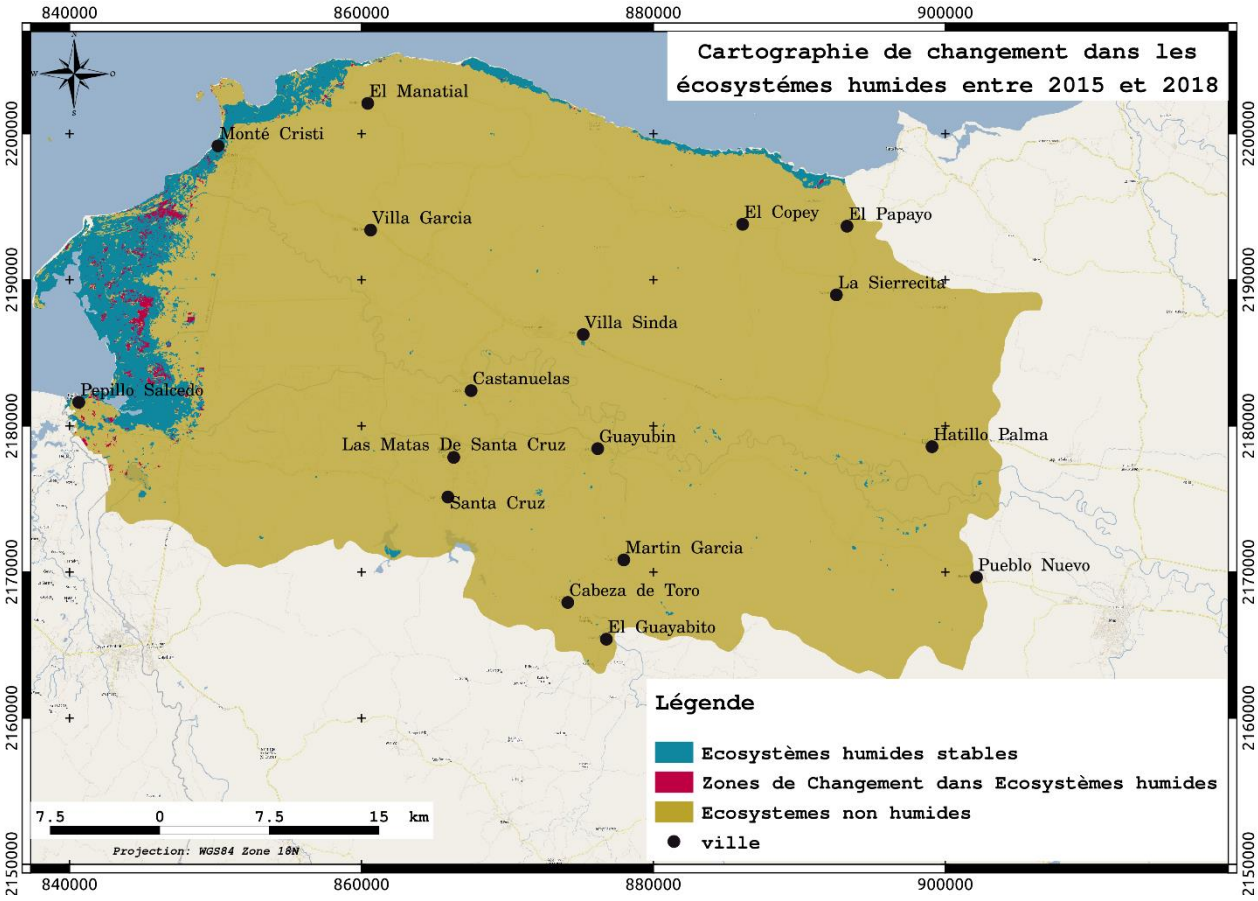


Figure 110: Cartographie de changement dans les écosystèmes humides entre 2015 et 2018

L’analyse des changements dans l’écosystème humide montre qu’entre 2015 et 2018, 603 ha ont été transformés et convertis en d’autres occupations de sol (sol nu, zones herbeuses par exemple). Cela représente une proportion de 5% en trois ans (figure 109).

Tableau 51: Zone de changement dans les écosystèmes humides à Monté Cristi

Strate	Surface (ha)	Proportion (%)
Ecosystèmes humides stables	10596	95
Zones de changement dans les écosystèmes humides	604	5
Total	12000	100

Bien que les actions de conservation aient été engagées, il nous parait indispensable de les intensifier au regard des rôles écologique et ethnobotanique de ces écosystémes.

III.2. Analyse historique relative à l'écosystème des forêts

La zone ‘‘forêt’’ sur laquelle se base notre analyse historique est composée des classes suivantes : forêts denses de plaine, forêts denses de montagne, plantations de pin, forêts denses d'acacia, forêts claires d'acacia, végétation arborée et arbustive. La figure 111 présente la cartographie binaire ‘‘forêt/non forêt’’ obtenue après regroupement des classes précitées dans la classification issue de la fusion des images Sentinel-1 et Sentinel-2.

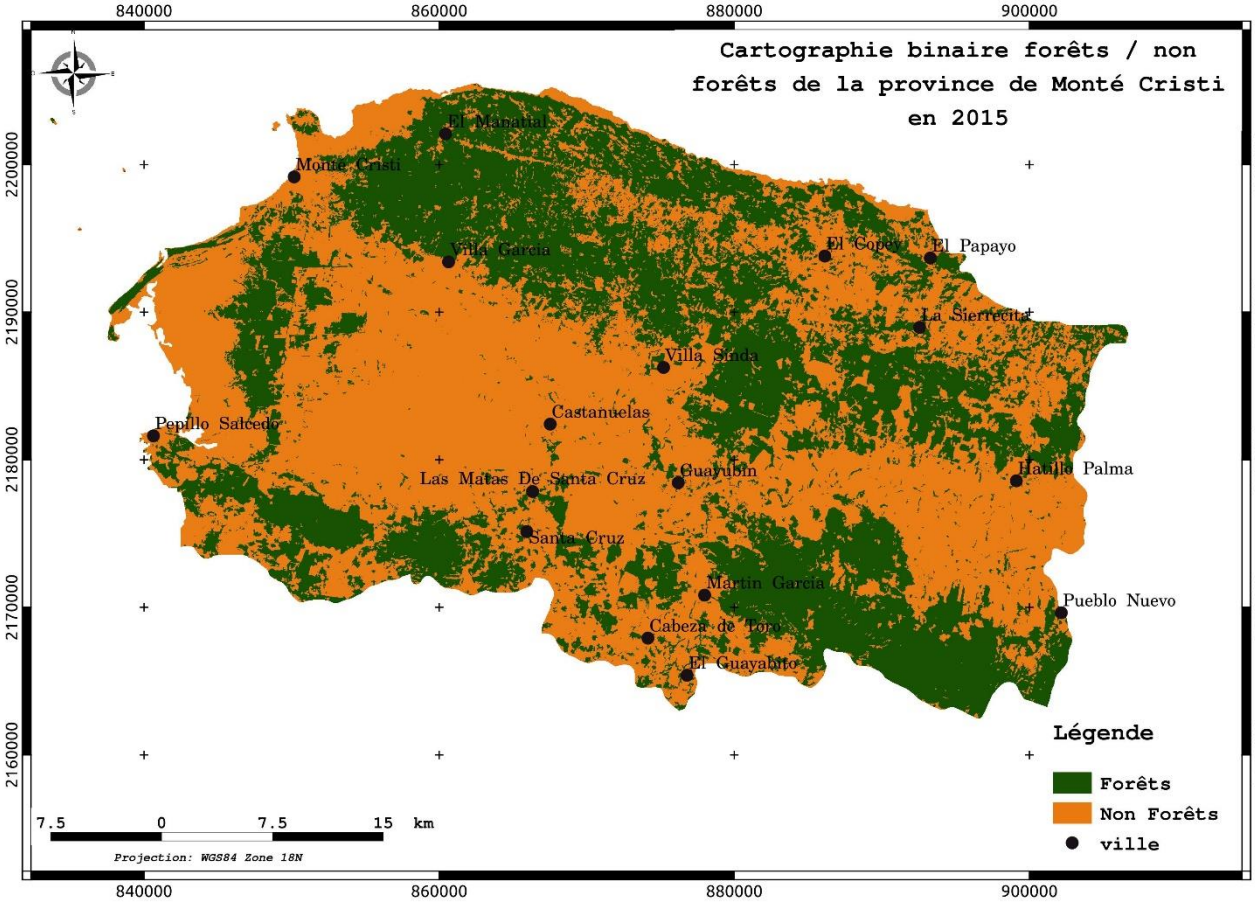


Figure 111: Cartographie binaire Forêts / Non Forêts de la province de Monté Cristi

L'analyse statistique de la cartographie binaire Forêt /Non Forêt de la province de Monte Cristi montre que l'écosystème forestier est de 83914 ha soit 44% de la surface totale de la province. On retrouve cet écosystème dans les zones montagneuses au Nord de la province et au Sud de la province. La partie centrale de la province essentiellement constituée de plaines est dépourvue de forêt et est occupée par la riziculture et des bananeraies.

Pour analyser la variation historique de l'écosystème forestier depuis 2015 nous avons utilisé une approche de détection de changement par seuillage (Lardeux et al, 2018) sur la série

temporelle de Sentinel-1 du 04 mai 2015 au 25 mars 2018. La figure 112 présente les zones de changement détectées entre 2015 et 2018 au niveau des écosystèmes des forêts.

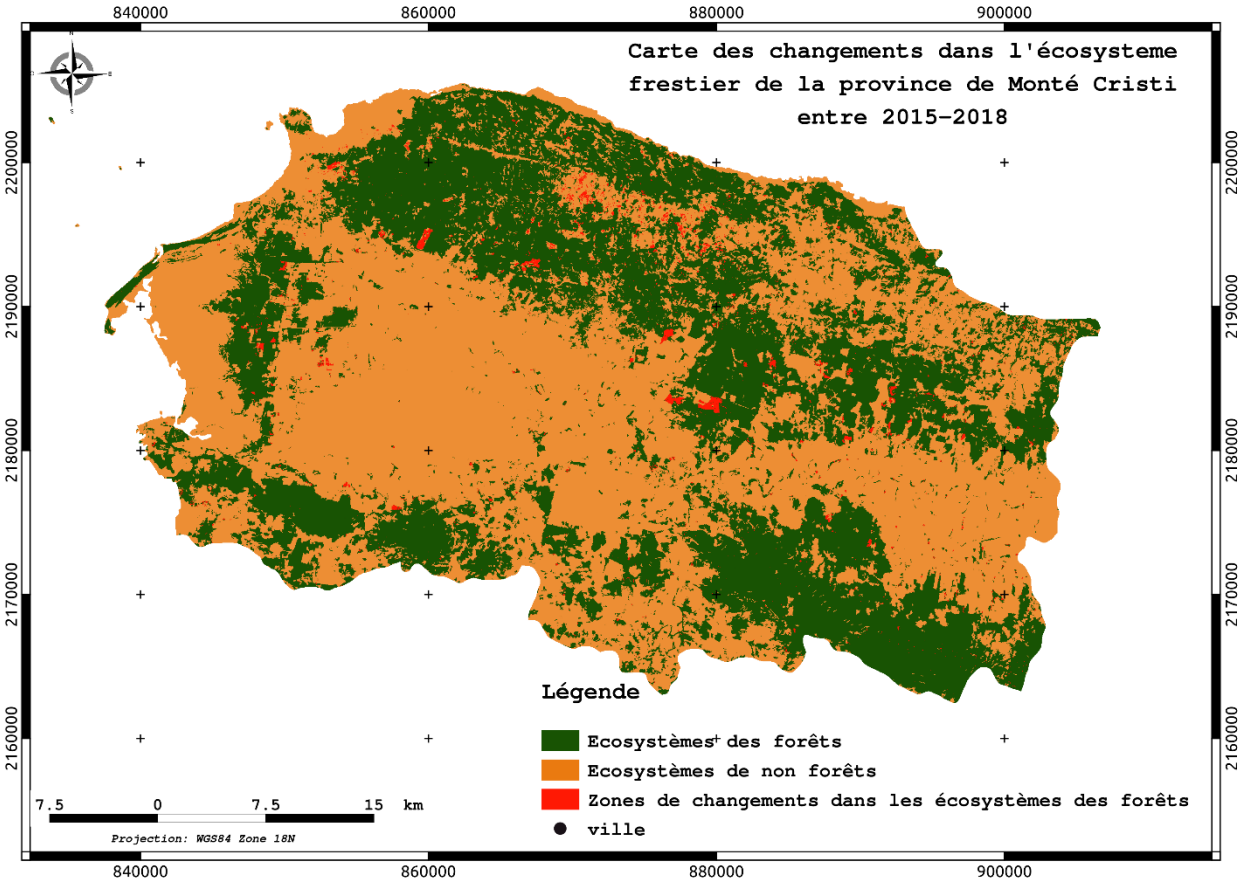


Figure 112: Carte de déforestation de la province de Monté Cristi entre 2015-2018

Sur la période de 04 mai 2015 au 25 mars 2018 l'analyse des changements dans l'écosystème forestier montre qu'environ 2000 ha ont été transformés en d'autres occupations du sol (comme les savanes, zones agricoles) (figure 112).

Strate d'occupation	Surface (ha)	Proportion (%)
Ecosystèmes forestiers en 2018	81916	97,62
Zones des changements dans les écosysteme des forêts entre 2015 et 2018	1998	2,38
Total (Ecosystème en 2015)	83914	100

On remarque que les zones de changement dans les écosystèmes des forêts ne représentent que 2% de la surface totale de cet écosystème. Ces resultats sont encouragants en termes de conservation et de protection des forêts dans la province. Cependant, il est indispensable de confirmer ces résultats avec les données de statistique sur l'évolution des forêts du ministere de l'environnement de la république dominicaine.

IV. Conclusion

Sur le site de Monté Cristi, nous avons exploré la limite de discrimination de différentes classes d'occupation du sol sur les images sentinel-1 et Sentinel-2, de façon séparée puis sur la combinaison des deux types images. Sur le terrain nous avons identifié au total 18 classes d'occupation du sol. Les régions d'intérêt ont été définies autour des points GPS collectés lors de la mission de terrain de juin 2018.

La classification SVM réalisée sur les images Sentinel-2 permet d'obtenir une précision globale de 89%. Celle réalisée sur la série de 43 dates Sentinel-1 conduit à une précision globale de 83%. La classification obtenue sur la combinaison des deux types d'images Sentinel-1 et Sentinel-2 donne une précision globale de 93%. Sur la base de la dernière classification (combinaison d'images Sentinel-1 et Sentinel-2) des cartes thématiques binaires ont été produites. Ainsi, des cartes binaires forêts/non forêts et écosystèmes humides /non humides sont produites pour l'année 2015. Des surfaces de ces écosystèmes ont été évaluées pour l'année 2015.

Nous avons analysé l'évolution des deux écosystèmes *''forêts''* et *''mangroves''* avec les images Sentinel-1 sur la période de 2015 à 2018. L'analyse des changements a montré que dans les zones de mangroves, 604 ha ont été convertis en d'autres formes d'occupations du sol, soit une conversion de 5% en trois ans. Dans les zones de forêt, 1998 ha de forêt ont été convertis en d'autres types d'occupations du sol autres que l'écosystème forestier soit une conversion de plus de 2% en 3 ans.

Le site test de Monté Cristi nous a permis d'explorer les limites de discrimination et d'extraction de 18 classes d'occupation du sol par classification supervisée et d'estimer la surface des écosystèmes fragiles. Il a permis également de faire le suivi des deux écosystèmes sur la période de 2015 à 2018.

Les cartes produites dans le cadre de cette étude sur la zone de Monte-Cristi sont transmises au Minstère de l'environnement en vue de produire des statistiques forestières de cette region.

Partie III :

Conclusions – Recommandations - Perspectives

Conclusion Générale:

L'objectif général de ce travail a été d'évaluer le potentiel des données de télédétection optique et radar libres d'accès pour le suivi des écosystèmes forestiers tropicaux. Nous avons particulièrement exploré dans cette thèse d'une part les données radar en bande C du capteur Sentinel-1 et en bande L du capteur Alos/Palsar et d'autre part les données optiques Sentinel-2 et landsat-8 ; ainsi que la combinaison des deux types d'images. Ces données ont été exploitées sur diffèrents sites d'étude, dans différents écosystèmes notamment le Parc National de Virunga (PNVi) en RDC, la Réserve de Faune de Togodo (RFT) et la réserve de biosphère de l'OKM au Togo, le littoral de Kourou en Guyane et celui de la province de Monté Cristi en République Dominicaine.

Cette étude a donné lieu à différentes approches méthodologiques. Les données utilisées ont subi une phase de prétraitement. Pour les images optiques, Sentinel-2 ou Landsat, nous avons procédé à une fusion de résolution des bandes par la technique de pansharpening (fusion des bandes). Cette approche a permis de ramener la taille du pixel de toutes les images Sentinel-2 à 10 m (initialement de 10, 20 et 60 m) et celle des images Landsat à 15 m (initialement 30m). Les images radar Sentinel-1 ont subi des corrections radiométriques, géométriques et un processus de réduction de bruit dans les images. Les corrections radiométriques et géométriques ont permis d'obtenir respectivement la valeur radiométrique des pixels et la transformation de l'image en géométrie sol. Après plusieurs tests de filtres, nous avons opté pour l'utilisation du filtre spatio-temporel de Quegan. Les choix de prétraitements adaptés à nos applications constituent les premiers résultats de cette thèse.

L'extraction d'information sous forme de carte a été effectuée à partir des deux types d'images utilisées séparemment puis conjointement. L'approche d'extration d'information appliquée est la classification supervisée. Nous avons opté pour la classification SVM après plusieurs tests sur les algorithmes disponibles. Cet algorithme permet d'avoir des résultats rapides avec un rapport qualité/efficacité supérieur à celui des autres algorithmes de classification que nous avons testé (maximum de vraisemblance, Random-Forest). Les résultats de ces classifications ont été validés et sont accompagnés de statistiques permettant d'évaluer la qualité des produits obtenus.

Nous avons également exploré deux approches de détection de changement sur les données Sentinel-1. Une approche par décomposition en ondelettes et une approche par seuillage. Ces

diverses méthodologies concernant l'extraction d'information dans les images ont été regroupées dans le chapitre trois de ce mémoire.

La deuxième partie de ce travail a été consacrée à la présentation des résultats :

Sur le site du PNVi, l'analyse diachronique de l'impact des conflits armés a montré que l'écosystème forestier du parc a connu une régression de 1987 à nos jours (2017). Sur cette période de 30 ans, plus de 268800 ha ont été perturbés par des activités anthropiques. Outre les multiples conflits armés qui ont rythmé la vie de cette région depuis l'indépendance et qui ont entrainé l'installation des populations dans les zones de forêt, la déforestation à l'intérieur et autour du parc trouve également son origine dans l'augmentation des besoins et usages généraux de la population. En effet, la *''ressource bois*'' représente la principale source d'énergie pour la population installée autour du PNVi. Par ailleurs, l'exploitation illégale du bois d'œuvre et l'exploitation artisanale et illégale des ressources minières ont également pour conséquence la réduction des surfaces de forêts du parc. L'ensemble des causes crée une pression importante sur la ressource naturelle, entrainant ainsi sa dégradation.

Au Togo, l'analyse des images radar et optiques en saison sèche et pluvieuse sur le site de la réserve de faune de Togodo et la réserve de biosphère de l'OKM permet de produire une carte d'occupation du sol de précision améliorée en combinant les cartes obtenues en saison des pluies et en saison sèche. Le couvert forestier global a été estimé à 7600 ha dans la réserve de faune de Togodo (30% de la surface totale) en 2017. Sur le site de l'OKM, le couvert forestier a été estimé à 42883 ha (13,2% de la surface totale) en 2017.

La détection de changements autour du pont de Saint-Georges de l'Oyapock en utilisant la décomposition en ondelettes a permis d'identifier les differents types de changements survenus sur cette zone (changements brusques avec variabilité saisonnière, changements progressifs avec presque aucune variabilité saisonnière visible). Ces changements dependent de l'utilisation des terres et des effets saisonniers. Sur la plaine du littoral de Kourou, la photo-interprétation des images Sentinel-1 nous a permis de délimiter les classes d'occupation du sol présentes sur la carte de référence, puis de déterminer les surfaces minimales des strates d'occupatoin du sol identifiés (forêt, mangrove, savanes). La surface minimale d'extraction des ilots de forêts est de 0,2ha soit 20 pixels de taille de 10*10m. La largeur minimale a été mesurée pour les objets linéaires comme les routes, et est de 20 m (2 pixels de taille de 10m). Les objets ponctuels correspondant à certains batis isolés ont pu être détectés sur les images de pixel 10m.

Sur le site de Monté Cristi en Republique Dominicaine nous avons procédé à l'extraction automatique de 18 classes d'occupation du sol identifiées sur le terrain. L'analyse des images

Sentinel-1 et Sentinel-2 a été effectuée séparement puis conjointement. Dans chaque cas des cartes d'occupation ont été produites. Les résultats ont montré que bien que la classification supervisée permette d'extraire des classes avec une bonne précision (>80%) pour les capteurs utilisés de façon séparée, la combinaison des deux types permet d'avoir une précision d'extraction superieure (> 93%). Ces résultats montrent donc l'apport de la fusion des images Sentinel-1 et Sentinel-2 dans la discrimination des classes d'occupation du sol dont les reponses spectrales sont très proches. Sur la base des cartes produites, un suivi historique (sur la période de 2015-2018 grâce à une série temporelle Sentinel-1) a été effectué sur deux écosystèmes vulnérables au changement climatique. Il s'agit de l'écosystème forestier (regroupant toutes les classes de forêts) et des écosystèmes humides (regroupant les mangroves et les zones humides).

Cette étude a mis en évidence le grand potentiel des images de télédétection optiques et radar libres d'accès pour la caractérisation et la cartographie de l'occupation du sol dans différents contextes environnementaux tropicaux. L'approche combinée des images optiques et radar s'avère très utile dans les zones où les variations saisonnières entrainent des changements dans les états de surface compliquant leur cartographie. Cela donne un rôle privilégié aux séries d'images radar (Sentinel-1) acquises pendant la saison humide. C'est bien le cas des écosystèmes tropicaux.

Recommandations

A l'issue de ce travail, nous pouvons formuler différentes recommandations suivant les thématiques traitées et les approches méthodologiques utilisées dans les différents sites d'étude.

- *Sur le PNVi en RDC :*

L'étude a montré l'extrême fragilité et la vulnérabilité du premier parc d'Afrique. Elle a également révélé le lien entre les conflits qui ont eu lieu dans la zone et l'augmentation des surfaces de déforestation. Il est donc nécessaire d'engager des actions afin de sécuriser le PNVi. Aussi il est nécessaire d'engager des actions de développement afin de réduire la pauvreté et la dépendance de la population aux ressources de la forêt. Il est à noter que sur la période de 2007-2017, la perte de couvert forestier dans la zone s'est considérablement réduite comparativement aux périodes de 1987-1997 et 1997-2007.

A travers cette étude, les données de télédétection ont servi à montrer le lien entre la dégradation et la déforestation dans le paysage de Virunga et les conflits et guerres qui ont eu lieu. Vue le contexte sécuritaire, les enjeux de conservation et de la disponibilité des images libres d'accès, il nous parait indispensable de mettre en place des outils d'alerte et de suivi basés sur l'utilisation de ces données satellitaires souvent de haute fréquence d'acquisition comme les

images du programme copernicus. Ces outils pourront aider les acteurs de développement qui œuvre (WWF, Fondation Virunga, UNESCO etc.) dans le pays pour de cibler plus facilement les zones d'intervention.

Sur le site de RFT et OKM au Togo :

Le Togo est caractérisé par une disparité saisonnière entre le nord et le sud du pays. Cette condition particulière rend difficile la cartographie des ressources forestières du pays une partie de l'année, et donc l'estimation précise des ressources forestières du pays.

L'approche de cartographie proposée dans cette étude, consiste à produire des cartes saisonnières. Par la suite des règles de priorisation des classes d'occupation ont été utilisées pour fusionner les cartes saisonnières afin d'obtenir des cartes annuelles. Cette approche nous semble être une approche bien adaptée à la situation du Togo. Nous recommandons ainsi à l'administration en charge des ressources forestières de tester cette approche afin d'évaluer son coût efficacité pour la production des cartes d'occupation du sol sur toute l'étendue du territoire.

Il est d'autant plus nécessaire d'avoir un état très précis des ressources du pays car le Togo s'est engagé dans le processus REDD+ avec l'élaboration de la stratégie nationale REDD+. Cette approche couplée avec l'estimation du carbone dans les écosystèmes forestiers du Togo pourra aider à une définition plus réaliste des actions dans la stratégie nationale REDD+.

- *Sur le site de la Guyane Française :*

L'approche de décomposition en ondelettes sur la série temporelle sentinel-1 nous a permis de détecter les zones de changement et par la suite ces changements ont été catégorisés : changements d'origine anthropique et changements saisonniers. Les prochaines améliorations de cette méthodologie pourraient s'orienter vers la détection et la caractérisation des changements. Ainsi cette future approche améliorée pourra être proposée pour le suivi des changements anthropiques qui ont des impacts sur les ressources forestières dans cette zone frontalière. Il s'agit essentiellement d'activité d'orpaillage et d'activité d'exploitation forestière (illégale ou non).

La reconnaissance des strates d'occupation du sol sur les cartes de végétation de la zone littorale de Kourou, a permis de mettre en avant la capacité de séparabilité des classes contenues dans la carte de végétation, à partir du capteur radar Sentinel-1. Cette application à partir des images radar Sentinel-1 pourra être envisagée dans le cadre du projet de cartographie des types d'habitat que le Ministère de la Transition Ecologique a engagé.

- *Sur le site de la province de Monté Cristi :*

L'application réalisée sur le site de la province de Monté Cristi a permis de produire des cartes proposant 18 classes d'occupation du sol. L'approche de classification sur la combinaison d'images Sentinel-1 et 2 a permis d'obtenir des résultats de bonne précision et à faible coût. Nous pensons que cette approche pourra être étendue à l'ensemble de l'ile, pour la cartographie des ressources dans laquelle le ministère de l'environnement en charge des forêts s'est engagé. En effet, le ministère de l'environnement de la République Dominicaine se propose de faire l'évaluation des ressources forestières afin d'établir un plan stratégique de gestion.

Il est aussi à souligner que dans cette étude, nous avons appliqué l'approche de détection automatique de changements sur deux classes d'occupation (forêts et mangrove). Les changements détectés ont été confirmés sur le terrain. Dans le cadre du plan stratégique de gestion des ressources forestières de l'ile, nous recommandons de reflechir à la possibilité d'intégrer dans ce plan de gestion un système de suivi basé sur les données sentinel-1 et 2 avec l'adaptation de l'outil de détection de changement à la réalité de l'ile.

Perspectives

A l'issue de ce travail, plusieurs perspectives et axes de recherche sont formulés :

Sur le plan du traitement des images :

- Dans ce travail nous avons abordé la notion de séparabilité de classes d'occupation du sol en prenant appui sur les différentes bandes spectrales optiques et sur les bandes radar polarimetriques. Cet aspect pourra être poursuivi dans nos futures recherches. En effet, une meilleure connaissance des bandes exactes ayant une contribution forte dans la discrimination des classes d'occupation pourra permettre la réduction du temps de traitement en appliquant uniquement les algorithmes de classification sur ces bandes.
- Poursuivre et améliorer l'approche de traitement sur la fusion des images optiques et radar, pour la cartographie de l'occupation du sol, et l'étendre sur les zones plus étendues notamment tout le territoire de la République Dominicaine avec une extension à Haïti.
- Accompagner l'administration en charge des ressources forestières sur l'état des lieux les ressources forestières du Togo avec la mise en application d'approches de production de cartes saisonnières à partir de la combinaison d'images radar et optiques.
- Poursuivre le développement de l'outil de détection de changement. En effet l'application sur le site de Monté Cristi a permis de relever des interrogations :
    - L'impact de la période et de la phénologie sur la détection des changements ?
    - L'impact de la saisonnalité (saison humide, saison sèche) ?

La necessité d'avoire des referenciels, notamment :

- Hauteur de cours d'eau ;
- Phenologie de la production agricole.

Sur le plan pratique (renforcement de capacité) :

Durant cette étude, nous avons pu nous rendre compte des initiatives qui permettent la mise à disposition gratuite de données d'imagerie gratuite et la pérennité de ces initiatives dans le temps. C'est le cas du programme Copernicus, avec la constellation des satellites Sentinel. Ainsi la disponibilité de données de télédétection n'est plus un frein pour les applications. Les limites actuelles sont dans la mise en valeur de données surtout dans les pays en développement. Il serait souhaitable de faciliter la mise en valeur de ces données dans ces pays, plus spécifiquement en Afrique à travers la mise en place de collaborations de formations. Nous souhaiterions donc mettre en place cette collaboration entre les universités d'Afrique et les agences spatiales (ESA, la JAXA, NASA etc.) avec l'appui de partenaires financiers pour l'animation de cette collaboration.

Annexes : Liste des images utilisées

Annexe 1 : *Liste et date des images utilisées sur le site du paysage des Virunga*

Tableau 52: Liste et date des images utilisées sur le site du paysage des Virunga

Système	Capteur	Couverture nuageuses (%)	Date d'acquisition
Sentinel-2 A et B	MSI	15	11-08-2017 20-01-2016
Landsat-8	OLI/TIRS	20	02-01-2017 09-08-2016 04-03-2016
Landsat-7	ETM+	25	31-01-2006 20-08-2007 22-04-2007
Landsat-5	TM	10	17-01-1995 15-08-1996 10-05-1997 10-01-1997
Landsat-5	TM	30	07-01-1985 07-08-1986 07-09-1987 07-10-1987

Annexe 2 : *Liste et date des images utilisées sur le site de l'OKM*

- *Liste et date des images optiques*

Tableau 53: Liste et dates des scènes utilisées

Système	Capteur	Date d'acquisition
Sentinel-2	MSI	13-01-2016 et 18-11-2016
Sentinel-2	MSI	03-01-2017 et 27-11-2017

- *Liste et date des images radars*

Tableau 54: Liste des images Sentinel-1 pour la cartographie l'OKM

N°	Système	Mode	Polarisation	Date d'acquisition
1	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	23/12/2017
2	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	11/12/2017
3	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	29/11/2017
4	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	17/11/2017
5	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	05/11/2017
6	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	14/07/2017
7	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	02/07/2017
8	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	20/06/2017
9	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	08/06/2017
10	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	27/05/2017

11	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	15/05/2017
12	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	03/05/2017
13	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	21/04/2017
14	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	09/04/2017
15	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	28/03/2017
16	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	16/03/2017
17	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	04/03/2017
18	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	20/02/2017
19	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	08/02/2017
20	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	27/01/2017
21	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	15/01/2017
22	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	03/01/2017
23	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	22/12/2016
24	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	10/12/2016
25	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	28/11/2016
26	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	16/11/2016
27	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	04/11/2016
28	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	11/10/2016
29	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	29/09/2016
30	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	17/09/2016
31	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	05/09/2016
32	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	24/08/2016
33	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	12/08/2016
34	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	31/08/2016
35	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	19/07/2016
36	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	07/07/2016
37	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	13/06/2016
38	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	01/06/2016
39	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	20/05/2016
40	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	08/05/2016
41	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	26/04/2016
42	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	14/04/2016
43	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	02/04/2016
44	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	21/03/2016
45	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	09/03/2016
46	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	26/02/2016
47	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	14/02/2016
48	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	02/02/2016
49	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	21/01/2016
50	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	09/01/2016
51	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	16/12/2015
52	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	04/12/2015
53	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	22/11/2015
54	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	10/11/2015
55	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	17/10/2015
56	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	05/10/2015
57	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	23/09/2015
58	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	11/09/2015
59	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	30/08/2015
60	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	18/08/2015
61	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	06/08/2015
62	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	25/07/2015
63	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	13/07/2015
64	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	01/07/2015
65	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	19/06/2015

66	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	07/06/2015
67	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	26/05/2015
68	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	14/05/2015
69	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	20/04/2015
70	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	08/04/2015
71	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	27/03/2015

Annexe 3 : *Liste et date des images utilisées sur le site de RFT*

- ***Sentinel-1***

Tableau 55: Liste des images Sentinel-1 pour la cartographie d'occupation du sol de la RFT

N°	Système	Mode	Polarisation	Date d'acquisition
1	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	23/12/2017
2	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	11/12/2017
3	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	29/11/2017
4	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	17/11/2017
5	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	05/11/2017
6	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	14/07/2017
7	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	02/07/2017
8	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	20/06/2017
9	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	08/06/2017
10	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	27/05/2017
11	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	15/05/2017
12	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	03/05/2017
13	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	21/04/2017
14	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	09/04/2017
15	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	28/03/2017
16	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	16/03/2017
17	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	04/03/2017
18	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	20/02/2017
19	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	08/02/2017
20	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	27/01/2017
21	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	15/01/2017
22	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	03/01/2017
23	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	22/12/2016
24	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	10/12/2016
25	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	28/11/2016
26	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	16/11/2016
27	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	04/11/2016
28	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	11/10/2016
29	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	29/09/2016
30	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	17/09/2016
31	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	05/09/2016
32	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	24/08/2016
33	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	12/08/2016
34	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	31/08/2016
35	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	19/07/2016
36	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	07/07/2016
37	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	13/06/2016
38	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	01/06/2016
39	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	20/05/2016
40	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	08/05/2016

41	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	26/04/2016
42	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	14/04/2016
43	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	02/04/2016
44	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	21/03/2016
45	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	09/03/2016
46	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	26/02/2016
47	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	14/02/2016
48	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	02/02/2016
49	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	21/01/2016
50	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	09/01/2016
51	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	16/12/2015
52	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	04/12/2015
53	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	22/11/2015
54	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	10/11/2015
55	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	17/10/2015
56	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	05/10/2015
57	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	23/09/2015
58	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	11/09/2015
59	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	30/08/2015
60	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	18/08/2015
61	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	06/08/2015
62	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	25/07/2015
63	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	13/07/2015
64	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	01/07/2015
65	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	19/06/2015
66	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	07/06/2015
67	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	26/05/2015
68	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	14/05/2015
69	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	20/04/2015
70	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	08/04/2015
71	Sentinel-1-A	IW/GRD	VV, VH	27/03/2015

- ***ALOS-2***

Tableau 56: Images PALSAR 2 disponible et exploitable sur le site de RFT (Sud Togo)

N°	Système	Mode	Polarisation	Date d'acquisition
1	ALOS-2	Bande L	HH, HV	2016
2	ALOS-2	Bande L	HH, HV	2017

Annexe 4 : *Liste et date des images utilisées sur le site du Kourou*

- Liste des images optiques

Tableau 57 : Images Pléiades utilisée sur le site de la plane de Kourou

Satellite	Résolution spatiales (m)	Taille des pixels (m)	Fauché (km)	Date d'acquisition
PLEIADES	0.7 x 0.7	0.5 x 0.5	20 x 20	10/12/2012
	2.8 x 2.8	2 x 2	20 x 20	10/12/2012

- Liste des images radas

Tableau 58: Images Sentinel-1 utilisées sur le site de la plaine littorale de Kourou

N°	Système	Mode	Polarisation	Date acquisition
1	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	01/01/2017
2	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	20/12/2016
3	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	14/12/2016
4	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	08/12/2016
5	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	26/11/2016
6	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	14/11/2016
7	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	02/11/2016
8	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	21/10/2016
9	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	10/10/2016
10	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	03/10/2016
11	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	27/09/2016
12	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	15/09/2016
13	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	03/09/2016
14	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	22/08/2016
15	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	10/08/2016
16	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	29/07/2016
17	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	17/07/2016
18	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	05/07/2016
19	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	11/06/2016
20	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	30/05/2016
21	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	18/05/2016
22	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	24/04/2016
23	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	12/04/2016
24	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	31/03/2016
25	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	07/03/2016
26	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	24/02/2016
27	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	12/02/2016
28	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	31/01/2016
29	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	19/01/2016
30	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	07/01/2016
31	Sentinel-1	IW/GRD	VV, VH	26/12/2015

Annexe 5 : *Liste et date des images utilisées sur le site du Saint-George de l'Oyapock*

Tableau 59: Images Sentinel-1 utilisées sur le site de Saint-Georges de l'Oyapock

N°	Système	Mode	Polarisation	Date d'acquisition
1	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	09/12/2017
2	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	27/11/2017
3	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	15/11/2017
4	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	03/11/2017
5	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	22/10/2017
6	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	10/10/2017
7	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	28/09/2017
8	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	16/09/2017

9	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	04/09/2017
10	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	23/08/2017
11	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	11/08/2017
12	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	30/07/2017
13	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	18/07/2017
14	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	06/07/2017
15	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	24/06/2017
16	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	12/06/2017
17	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	31/05/2017
18	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	19/05/2017
19	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	07/05/2017
20	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	25/04/2017
21	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	01/04/2017
22	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	20/03/2017
23	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	08/03/2017
24	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	24/02/2017
25	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	31/01/2017
26	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	07/01/2017
27	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	14/12/2016
28	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	03/10/2016
29	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	03/12/2017
30	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	21/11/2017
31	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	09/11/2017
32	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	28/10/2017
33	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	16/10/2017
34	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	04/10/2017
35	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	22/09/2017
36	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	10/09/2017
37	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	29/08/2017
38	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	17/08/2017
39	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	05/08/2017
40	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	24/07/2017
41	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	12/07/2017
42	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	18/06/2017
43	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	06/06/2017
44	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	25/05/2017
45	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	01/05/2017
46	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	19/04/2017
47	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	07/04/2017
48	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	26/03/2017
49	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	02/03/2017
50	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	18/02/2017
51	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	06/02/2017
52	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	25/01/2017
53	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	13/01/2017
54	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	01/01/2017
55	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	20/12/2016
56	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	14/12/2016

57	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	8/12/2016
58	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	26/11/2016
59	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	14/11/2016
60	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	11/02/2016
61	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	21/10/2016
62	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	10/10/2016
63	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	3/10/2016
64	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	27/09/2016
65	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	15/09/2016
66	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	03/09/2016
67	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	22/08/2016
68	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	10/08/2016
69	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	29/07/2016
70	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	17/07/2016
71	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	05/07/2016
72	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	11/06/2016
73	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	30/05/2016
74	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	18/05/2016
75	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	24/04/2016
76	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	12/04/2016
77	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	31/03/2016
78	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	07/03/2016
79	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	24/02/2016
80	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	12/02/2016
81	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	31/01/2016
82	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	19/01/2016
83	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	07/01/2016
84	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	26/12/2015
85	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	02/12/2015
86	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	20/11/2015
87	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	08/11/2015
88	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	12/05/2015
89	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	07/01/2016

Annexe 6 : *Liste et date des images utilisées sur le site de Saint-Domingue*

- *Liste des images optiques*

Tableau 60: Liste et dates des scènes utilisées

Système	Capteur	Date d'acquisition
Sentinel-2A	MSI	12-01-2016
Sentinel-2A	MSI	04-01-2017
Sentinel-2B	MSI	26-10-2017
Sentinel-2B	MSI	24-01-2018

- *Liste des images radar*

Tableau 61: Images Sentinel-1 utilisées sur le site de la province de Monté Cristi

N°	Système	Mode	Polarisation	Date d'acquisition
1	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	25/03/2018
2	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	13/03/2018
3	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	01/03/2018
4	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	17/02/2018
5	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	05/02/2018
6	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	24/01/2018
7	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	12/01/2018
8	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	31/12/2017
9	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	19/12/2017
10	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	07/12/2017
11	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	07/12/2017
12	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	25/11/2017
13	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	13/11/2017
14	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	01/11/2017
15	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	20/10/2017
16	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	08/10/2017
17	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	26/09/2017
18	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	20/09/2017
19	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	14/09/2017
20	Sentinel-1B	IW/GRD	VV, VH	08/09/2017
21	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	02/09/2017
22	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	21/08/2017
23	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	09/08/2017
24	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	28/07/2017
25	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	16/07/2017
26	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	04/07/2017
27	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	22/06/2017
28	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	10/06/2017
29	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	29/05/2017
30	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	17/05/2017
31	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	05/05/2017
32	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	23/04/2017
33	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	11/04/2017
34	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	30/03/2017
35	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	22/02/2017
36	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	10/02/2017
37	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	01/10/2016
38	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	10/05/2016
39	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	23/03/2016
40	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	28/02/2016
41	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	04/02/2016
42	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	11/01/2016
43	Sentinel-1A	IW/GRD	VV, VH	04/05/2015

Références bibliographiques :

Abotchi T. 1997 : Dynamisme économique et évolution du milieu rural dans l'est de la région des plateaux au Togo. Thèse de doctorat de Géographie tropicale. Université Michel Montaigne, Bordeaux III. 377 p.

Addra K.M., 1981: Relief. Atlas du Togo, Editions Jeune Afrique, Paris 4-5p.

Adjonou, 2011: Structure et indicateurs biologiques de gestion durable des reliques de forets seches du Togo. Thése de doctorat, Université de Lomé.

Adou, Yao, C. Y, Blom, E. C., Dengueadhé, K. T. S., Rompaey, R. S. A. R. van, N'Guessan, E. K., Wittebolle, G., Bongers, F. 2005: Diversité floristique et végétation dans le Parc National de Taï, Côte d'Ivoire. Tropenbos-Côte d'Ivoire Serie 5, 92 p.

Amolins K., Zhang Y., and Dare P., 2007: Wavelet based image fusion techniques an introduction, review and comparison, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 62, no. 4.

Anderson R. R. and Wobber F.J. 1973: wetlands mapping in New Jersey. Photogrammetric Engineering. 39(4): pp 353-358.

Antropov O., Rauste Y., Seifert F. M., and Hme T., 2015: Selective logging of tropical forests observed using l- and c-band SAR satellite data," IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), July 2015, pp. 3870–3873.

Asner G.P., Keller M., Pereira R., Zweede J.C., 2002: Remote sensing of selective logging in Amazonia. Assessing limitations based on detailed field observations, Landsat ETM+, and textural analysis. Remote Sensing of Environment, n° 80, p.p. 483-496.

Asner G.P., Knapp D.E., Broadbent E.N., Oliveira P.J.C., Keller M., Silva J.N., 2005: Selective logging in the Brazilian Amazon. Science, vol. 310, p.p. 480-482.

Atto A. M. and Mercier G., 2015: High order structural image decomposition by using non-linear and non-convex regularizing objectives; Computer Vision and Image Understanding, vol. 138, no. Supplement C, pp. 38 – 50.

Atto A. M., Trouvé E., Berthoumieu Y., and Mercier G., 2013: Multi date divergence matrices for the analysis of Sar image time series; IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 51, no. 4, pp 18.

Atto A. M., Trouvé E., Nicolas J. M., and Lêe T. T., 2016: Wavelet operators and multiplicative observation models - application to Sar image time series analysis, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 54, pp, 18 2016. Available: http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2016.2587626

Atutonu A., 2005 : Contribution à la gestion durable du Parc National de Togodo-Sud (Togo). Mémoire de DESS de l'ERAIFT République Démocratique de Congo(RDC), 75p.

Baghdadi, N., Cresson, R., El Hajj, M., Ludwig, R., et La Jeunesse, I. 2012: Estimation of soil parameters over bare agriculture areas from C-band polarimetric SAR data using neural networks. Hydrol. Earth Syst. Sci. 16, 1607–1621.

Breiman L., 2001: Random forests. Machine Learning, pp 45.

Bartsch A, Höfler A, Kroisleitner C, et Trofaier A. M., 2016 : "Land Cover Mapping in Northern High Latitude Permafrost Regions with Satellite Data: Achievements and Remaining Challenges" Remote Sensing. pp12, 979; https://doi.org/10.3390/rs8120979.

Bonn, F., et Rochon, G. 1992 : Précis de télédétection volume 1: Principes et méthodes. Sainte-Foy: Presse de l'université du Québec/AUPELF, 485 p.

Boser B. E., Guyon I., and Vapnik V., 1992: A training algorithm for optimal marginclassifiers. InProceedings of the Fifth. Annual Workshop on Computational LearningTheory, pages 144–152.

Bouvet A., Mermoz S., Ballère M., Koleck T. et Le Toan T., 2016: Use of the SAR Shadowing Effect for Deforestation Detection with Sentinel-1 Time Series. Remote Sensing of Forest Cover Change. 1250; https://doi.org/10.3390/rs10081250

Brown S., 1997: Forests and climate change: Role of forest lands as carbon sinks. Proceeding of XI World Forestry Congress, Antalya, Turkey, 13-22 October 1997, Volume 1, Topic 4.

CCRS, 2008: Glossaire des termes de télédétection. Centre Canadien de télédétetion. http://www. rs.nr an.g . a/glossary/index_f.php?id=3124.

Chave J., Andalo C., Brown S., Cairns M.A., Chambers J.Q., Eamus D., Fölster H., Fromard F., Higuchi N., Kira T., Lescure J.P., Nelson B.W., Ogawa H., Puig H., Riéra B. et Yamakura T., 2005: Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests.Oecologia, 145(1): 87–99. 106,193.

Chave J., Condit R., Aguilar S., Hernandez A., Lao S. et Perez R., 2004: Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. Philosophical Transactions ofthe Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 359(1443): 409–420. 40, 46, 51

Chave J., Coomes D., Jansen S., Lewis S.L., Swenson N.G. et Zanne A.E., 2009: Towards a worldwide wood economics spectrum. Ecology Letters, 12(4): 351–366. 24.

Chave J., Riéra B. et Dubois M.A., 2001: Estimation of biomass in a Neotropical forest of French Guiana: spatial and temporal variability. Journal of Tropical Ecology, 17(1):79–96. 106.

Cherel. J.P., 2010: Support de cours M1 SIIG3T- Traitement d'images – Classification d'images de télédétection.

Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J. et Heimann M., 2014: Carbon and other biogeochemical cycles. Dans: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, p. 465–570.

CPCS, 1967: Classificationdes sols. Rapport Multigramme. 90 p.

Congalton, R. 1991: A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. Remote Sensing of Environment, 37:35–46.

Cloude S. R., and Pottier E., 1997: An Entropy Based Classification Scheme for Land Applications of Polarimetric SAR, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, No. 1, p. 68-78.

Corbane C, Lang S, Pipkins K, Alleaume S, Deshayes M, Millán VEG, Strasser T, Borre JV, Toon S, Michael F., 2015 : Remote sensing for mapping natural habitats and their conservation status – new opportunities and challenges. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation pp 37.

Cowardin L.M., Myers V.I., 1974: Remote sensing for identification and classification of wetland vegetation. The journal of wildlife, 38(2), pp 308-314.

Dissanska M, Bernier M et Payette S. 2009: Object-based classification of very high resolution panchromatic images for evaluating recent change in the structure of patterned peatlands. Canadian Journal of Remote Sensing 35(2): 189-215.

Dissanska M, Bernier M, Rousseau AN, Chokmani K et Jutras S., 2007: Étude de la connectivité physique des tourbières au réseau hydrographique du bassin versant de La Grande rivière à l'aide d'une classification orientée objet d'images Landsat-7 ETM+. in Rapport de recherche INRS), p 1-63.

DeSy v, Herold M , F Achard F, Beuchle R, Clevers J G P W, Lindquist E, et Verchot L, 2015 : Land use patterns and related carbon losses following deforestationin South America. Environmental Research Letters P. 16.

De Wasseige C. et Denvers D., 2011 : Les forêts du Bassin du Congo : Etat des forêts 2010. Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg.

De Wasseige C., de Marcken P., Bayol N., Hiol Hiol F., Mayaux Ph., Desclée B., Nasi R., Billand A., Defourny P. and Eba'a, Atyi R., 2012: The forests of the Congo Basin: State of the Forest 2010. Publications Office of the European Union. Luxembourg. 276 p. ISBN: 978-92-79-22716-5.

De Wasseige C., Flynn J., Louppe D., Hiol Hiol F. and Mayaux, Ph., 2014: The forests of the Congo Basin: State of the Forest 2013. Weyrich. Belgium. 328p. ISBN : 978-2-87489-299-8.

Defourny P., Delhage C. et Kibambe Lubamba J-P., 2011 : Analyse quantitative des causes de la déforestation et de la dégradation des forêts en République Démocratique du Congo.UCL/FAO/CN REDD, Kinshasa.

Demarez, V., Proisy, C., Gastellu-Etchegorry, J. P., Dufrêne, E., LeDantec, V., Mougin, E., Marty, G., 1999: Seasonal variation of leaf chlorophyll content of a temperate forest. Inversion of the PROSPECT model. Int. J. Remote Sensing, 20 (5): 879-894.

Denvers D. et Vande Weghe J. P., 2007 : Les forêts du Bassin du Congo : Etat des forêts 2006. Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg.

DFC, 2007 : Rapport du processus de gestion durable des terres rétrocédées du Parcs National de Togodo-Sud, 9 p.

Dicks et Lo 1990: Evaluation of thematic map accuracy in a land-use and land-cover mapping program. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 56(9):1247–1252.

Do M.N. and Vetterli M., 2002: Wavelet-based texture retrieval using generalized gaussian density and kullback-leibler distance; IEEE Transactions on Image Processing, vol. 11, no. 2, pp. 146 – 158.

Elachi C., 1988: Spaceborne radar remote sensing: applications and techniques. New York, IEEE Press, 1988, 285 p.

Engdahl M., Minchella A., Marinkovic P., Veci L., et Lu J., 2012: NEST: An ESA open source Toolbox for scientific exploitation of SAR data. In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International, pages 5322–5324.

Evans T., Costa M., Telmer K., et Silva T., 2010: Using ALOS/PALSAR and RADARSAT-2 to Map Land Cover and Seasonal Inundation in the Brazilian Pantanal. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 3(4):560–575.

Ern H., 1979: Die Vegetation Togo. Gliederrung, Gefährdung, Erhatung. Willdenowia 9: 295312.

EUROFOR, 1994 : L'Europe et la forêt. Luxembourg, Parlement européen. Tome 1, 768 pages; tome 2, 754 pages; tome 3, 348 pages.

FAO, 2000 : Collecte et analyse de données pour l'aménagement durable des forêts - Joindre les efforts nationaux et internationaux. Actes de l'atelier sous régional sur les statistiques forestières et les perspectives pour le secteur forestier en Afrique / FOSA sous-région ECOWAS (Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 13-18 décembre 1999), FAO, Rome, 310 pages.

FAO, 2003 : Rapport final du XII^{ème} Congrès Forestier Mondial. Québec (canada), 21-28 septembre 2003, FAO, Rome, rapport en ligne sur : http://www.fao.org/forestry.

FAO, 1981 : Manuel d'inventaire forestier. Etude FAO-Forêt n° 31, Rome, 62 p.

FAO, 1981: Forest Resources of Tropical Africa, Pat I et II (Country briefs), Tropical Forest Resources Assessment Project. FAO, Rome, 119 pages.

FAO, 1990 : Aménagement des forêts naturelles des zones tropicales sèches. Cahier FAO Conservation n° 32, coordonné par Bellefontaine R., Gaston A. et Petrucci Y., FAO, Rome, 234 pages.

FAO, 1991 : Principe d'imagerie radar. Centre de télédétection FAO, Série RSC 62, 80p.

FAO, 1993: Forest Resources Assessment 1990: Tropical Countries. FAO Forestry Paper 112, 61 pages + annexes.

FAO, 1994: Forest Resources Assessment 1990. Country Briefs, FAO, 294 pages.

FAO, 1995 : Evaluation des ressources forestières, 1990. Pays tropicaux. Etudes FAO, Forêt, 112 pages.

FAO, 1997 : Rapport final du X^{ème} Congrès Forestier Mondial. Québec (canada), 17-26 septembre 1991, FAO, Rome, rapport en ligne sur : http://www.fao.org/forestry.

FAO, 1997 : Evaluation des Ressources Forestières, 1990, Pays Tropicaux, Etude FAO–Forêts, n° 112, Rome, Italie, 94 p.

FAO, 1997: Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests, FAO Forestry Paper 112, 61 pages + annexes.

FAO, 1999 : Situation des forêts dans le monde. Rome, FAO, 154 pages.

FAO, 2001 : Directives pour la Collecte Régulière de Données sur les Pêches de Capture. Etudes FAO, Forêt, 112 pages.

FAO, 2010: Evaluation des ressources forestières mondiales 2010. Forêt, 152 pages.

FAO, 2015: Evaluation des ressources forestières mondiales 2015 ; Rome, 2014.

Fenstermaker L., 1991: A proposed approach for national to global scale error assessments. In: Proceedings GIS/LIS '91, ASPRS, ACSM, AAG, AM/FM International and URISA, Vol. 1, pp. 293–300.

Ferreira, K. R., de Oliveira, A. G., Monteiro, A. M. V., and de Almeida, D. B.: 2015. Temporal GIS and spatiotemporal data sources. InGeoInfo, pp 1–13.

Fieuzal R., 2013 : Alos Formosat-2 Modélisation électromagnétique Optique Radar Radarsat-2 Spot Suivi des Cultures Surfaces Agricoles TerraSAR-X Télédétection Télédétection en sciences de la Terre Écologie agricole., These de doctorat Université de Toulouse.

Fishpool L. D. and Evans M. I., 2001: Important Bird Areas in Africa and associated islands: Priority sites for conservation. Newbury and Cambridge, UK: Pisces Publications and Bird Life International (Bird Life Conservation Series No. 11).

Fishpool L.D.C. and Evans M.I., 2001: Important Bird Areas in Africa and Associated Islands: Priority sites for conservation. Pisces Publications and BirdLife International, Newbury and Cambridge.

Floury N., Le Toan T., Ribbes F., Wang L.-F., Ding K.-H., Kong J.A., Fujita M., et Kurosu T., 1997: "Rice crop mapping and monitoring using ERS-1 data based on experiment and mode lling results". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35,n° 1, 41-56

Foody Giles M., Mark Cutler E., Julia McMorrow., Dieter Pelz., Hamzah Tangki., Doreen Boyd S., Ian Douglas., 2001: Mapping the biomass of Bornean tropical rain forest from remotely sensed data, https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2001.00248.x

Galletti A. and Maratea A. 2016: Numerical stability analysis of the centered log-ratio transformation, in 2016 12th International Conference on Signal-Image Technology Internet-Based Systems (SITIS), pp. 713–716.

Girard M.C. & Girard C.M., 1999. Le traitement des données de télédétection**.** Dunod, Paris, 529 p. + CD-Rom.

Garzelli A. and Zoppetti C., 2017: Optimizing SAR change detection based on log-ratio features in 2017 9th International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (MultiTemp).

Gemine V., Alparone L., Chanussot J., Dalla Mura M., Garzelli A., 2015: A critical comparison of pansharpening algorithms. IEEE International Geoscience and Remote Sensing. Symposium (IGARSS 2014), Jul 2014, Quebec, Canada. USBKey, pp.191-194.

GIEC., 2016 : Rapport annuel du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, www.ipcc.ch , 156p.

Girard, M-C. et Girard, C.D., 1999 : Traitement des données de télédétection. Cours de télédétection. Institut national agronomique Paris-Grignon. France. 530 p.

Gond V. et Brognoli C., 2005 : Télédétection et aménagement du territoire : localisation et identification des sites d'orpaillage en Guyane française. Bois et forêts des tropiques. n°286, p. 5-13.

Gond V., FÉAU C., PAIN-ORCET M., 2003 : Télédétection et aménagement forestier tropical : les pistes d'exploitation. Bois et Forêts des Tropiques, 275 pages : 29-36.

Gosselin P-H., Jefersson A. D. S., Penatti O., Torres R. D. S., Philipp-Foliguet S., Falcao A. X., 2013 : Remote Sensing Image Representation based onHierarchical Histogram Propagation. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 50, no. 10,pp. 3764–3775.

Guerriero L., Egido A., Caparrini M., Ruffini G., Paloscia S., Santi E., Pierdicca N., et Floury N., 2012 : Global Navigation Satellite Systems Reflectometry as a Remote Sensing Tool for Agriculture. Remote Sensing, 4(8), 2356-2372; https://doi.org/10.3390/rs4082356.

Guitet S., 2005 : Mieux valoriser la ressource en bois et réduire les impacts sur l'environnement : deux objectifs convergents pour une exploitation durable en Guyane française. Rendez-Vous Techniques de l'ONF, 9 : 65-69 pages.

Guitet S., 2015 : Diversité des écosystèmes forestiers de Guyane française : distribution, déterminants et conséquences en termes de services écosystémique. Thèse d'Ecosystèmes et Sciences Agronomiques, Université de Montpellier, 364 p.

Halima Talab, Simona Niculescu, Vanessa Sellin, Christophe Bougault, 2017: Contribution de la nouvelle série d'images Sentinel-1 pour le suivi de la végétation dans le Pays de Brest.

Hall, J. B., Swaine, M. D. 1981. Distribution and ecology of vascular plants in a rain forest vegetation in Ghana. Geobotany I, 383 p.

Hay A., 1979: Sampling designs to test land-use map accuracy. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 45(4):529–533.

Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G., 2013: High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, Science 15 Nov 2013: Vol. 342, Issue 6160, pp. 850-853, DOI: 10.1126/science.1244693.

Hess, L. L., Melack, J. M., Novo, E. M. L. ., Barbosa, C. C. et Gastil, M. 2003: Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. Remote Sensing. Environnement. 87, 404–428.

Hoidridge L.R. 1947: Determination of World Plant Formations from Simple Climatic Data. Science Vol. 105, No. 2727. pp. 367-368.

Holdridge, L.R 1947: The Pine Forest and Adjacent Mountain Vegetation of Haiti, considered from the Standpoint of a New Climatic Classification of Plant Formations. Ph. D. Dissertation, Univ. of Michigan, University Microfilms, Ann Arbor. pp. 1-186.

Homer-Dixon T.F., 1994: Environmental Scarcities and Violent Conflict: Evidence from Cases, Peace and Conflict Studies Program, University of Toronto International Security, 40 p.

Houngbedji G. M., 2010 : Etude de conservation du singe à ventre rouge (Cercopithecus erythrogaster erythrogaster) dans la dépression de Tchi au sud Benin. Mémoire de DEA, Université Agbomé Kalavi, Benin 93 p.

Hussain, M., D. Chen, A. Cheng, H. Wei & D. Stanley, 2013: Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 91-106.

IPCC, 2001 : Incidences de l'évolution du climat dans les régions : évaluation de la vulnérabilité en Afrique. Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on The Regional Impacts of Climate Change. An Assessment of Vulnerability, chapitre 2, OMM-PNUE, 60 pages.

Kémavo A., 2013 : Contribution à l'élaboration d'un plan directeur d'aménagement participatif de la réserve de biosphère d'Oti-Krean/Oti-Mandouri. Rapport d'Etude UNESCO 41 p.

Kokou K., 1998. Les mosaïques forestières au sud du Togo : biodiversité, dynamique et activités humaines. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France, 140 p.

Kokou, K. et Kokutse, A. D. 2006. Rôle de la régénération naturelle dans la dynamique actuelle des forêts sacrées littorales du Togo. Phytocoenologia, 36: 403-419.

Köppen W., 1936: Das geographische System der Klimate, in: Köppen W. and Geiger R. (eds.), Handbuch der Klimatologie, Gebrfider Borntraeger, Berlin, 46 p.

Kwitt R. and Uhl A., 2008: Image similarity measurement by Kullback-Leibler divergences between complex wavelet subband statistics for texture retrieval," International Conference on Image Processing, ICIP, San Diego, California, USA, pp. 933 – 936.

Laporte N, 1999 : Géographie des Relations Ville-Forêt en Afrique Centrale : Approche Régionale (Volume II). Rapport au Biodiversité Support Program, Whashington DC, Programme Régional de l'Afrique Centrale pour l'Environnement, 34 pages.

Laporte N., S.J. Goetz, C.O. Justice, et M. Heinicke. 1998: A New Land Cover Map of Central Africa Derived from Multi-resolution, Multi-temporal AVHRR Data. International Journal of Remote Sensing, 19(18): 3537-3550.

Laporte N.T. et T.S. Lin. 2003: Monitoring Logging in the Tropical Forest of Republic of Congo with Landsat Imagery. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 21-25 July 2003, Toulouse, France, Vol. IV: 2565-2567.

Lardeux C., Frison P. L., Tison C., Souyris J. C., Stoll B., Fruneau B., and Rudant J. P., 2009: Support vector machine for multifrequency SAR polarimetric data classification. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 47 (12), 4143–4152.

Lee, J.-S., Grunes, M. et de Grandi, G. 1999: Polarimetri SAR spekleltering and its implication for lassication. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 37(5): 2363 2373.

Lee, J.-S., S huler, D. et Ainsworth, T. 2000: Polarimetric SAR data ompensation for terrain azimuth slope variation. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 38(5):2153 2163.

Lu D, Mausel P, Brondizio E et Moran E., 2004: Change détection techniques. Inerternatioanl Journal Remonte Sensing pp. 25 ; 2365-2407.

Maitre H., 2001 : Traitement des images de RSO. Edition Hermès Science Europe. ISBN 2-7462-0155-0. 41p-51p.

Marin F. Bovolo T. and Bruzzone L., 2015: Building change detection in multitemporal very high resolution SAR images, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 53, no. 5, pp. 2664–2682

Marquant B. 2015 (a) : Importance des forêts d'Afrique central :- Etat de la forêt en 2013 - Chapitre 1, 19 pages.

Marquant B. 2015 (b) : Importance des forêts d'Afrique central :- Etat de la forêt en 2013 - Chapitre 1, 19 pages.

Massonnet D. et Souyris J.C., 2008 : Imaging with Synthetic Aperture Radar ; edité par EPFL.

Mazas C., 2007 : Changement climatique et usages des terres: vers le modèle Nexus Land Use. Rapport Stage Master Recherche EDDDE. 172 p.

Malhi Y. et Grace J., 2000: Tropical Forests and Atmospheric Carbon Dioxide. Trends in Ecology and Evolution, 15, 332-337.http://dx.doi.org/10.1016/S0169-5347 (00)01906-6.

MECNT, 2010 : Rapport annuel d'activité du Minsitere de l'Environnement, de la Conservation de la Nature et du Tourisme de la République Démocratique du Congo, 57p.

MERF, **2002 :** Monographie nationale sur la diversité biologique, cellule de coordination du Plan Nationale d'Action pour l'Environnement, Lomé, Togo 171 p.

MERF, 2011 : Plan d'Action Forestier National du Togo-Phase1 (PAFN 1-TOGO) 2011-2019 161p.

MERF, 2003 : Stratégie et plan d'action pour la conservation de la diversité biologique, Lomé, Togo, 136 p.

Mermoz S., Le Toan T., 2016: Forest disturbances and regrowth assessment using alos palsar data from 2007 to 2010 in Vietnam, cambodia and lao pdr. Remote Sensing 8.

Mountrakis, G., Im, J. and Ogole, C., 2011: Support vectormachines in remote sensing: A review**.** ISPRS Journal of Pho-togrammetry and Remote Sensing 66(3), pp. 247–259.

Mitchell H., 2010: Image Fusion: Theories, Techniques and Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. vol. 10, no. 3.

Proisy, C., Mougin, E., Marty, G., Fromard, F., Puig, H., Bétoulle, J. L., Rudant, J.P., 1999: Multifrequency and multipolarization radar backscattering from mangrove forests. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 37(1): 94-102.

MPATHU, 2001 : Mise en œuvre d'un programme de réhabilitation des aires protégées au Togo Etude d'une stratégie globale de mise en valeur – COM-STABEX/91-94, page 5, 210 p.

Murayama, H., K. Kageyama, A. Shimada, & A. Nishiyama, 2005: Improvement of spatial resolution for strain measurements by analyzing Brillouin gain spectrum. International Society for Optics and Photonics, in Bruges, Belgium-Deadline Past, pp. 551-554.

Nasi R., Billand A. and Van Vliet N., 2011: Empty forests, empty stomachs: bushmeat and livelihoods in Congo and Amazon Basins. International Forestry Review. p. 355-368.

Niamien D., 2013 : Evaluation du potentiel des données radar multi-paramètres pour la cartographie en milieu tropical humide: Applications en Guyane française et en Côte d'Ivoire. Mémoire de thèse de doctorat, UPEM.

Nicolini E., 1997 : Approche morphologique du développement du hêtre (Fagus sylvatica L.). Thèse. Université de Montpellier II.

Olmsted C., 1993, Scientific SAR user's guide, Alaska SAR Facility, ASF-SD-003, 57.

Oumar Z. 2016: Assessing the Utility of the SPOT 6 Sensorin Detectingand MappingLantana camarafor a Community Clearing Project in KwaZulu-Natal, South Africa. South African Journal of Geomatics, Vol. 5. No. 2, p 13.

Pajares G. and de la Cruz J. M., 2004: A wavelet-based image fusion tutorial," Pattern Recognition, vol. 37, no. 9, pp. 1855 – 1872.

Paquerault S., 1998 : Restitution du relief à partir d'images radar par radarclinométrie ; Thèse en Technologie et Science de l'Information, Telecom Paris.

Pargade J., 2000 : Analyses des variations spatio-temporelles du flux de CO_2 d'un sol forestier mesuré par la méthode dynamique. DEA de Biologie Forestière, Université H. Poincaré, Nancy, INRA Bordeaux, 30 p.

Pelletier C, Silvia Valero S, Inglada J, Nicolas Champion N, Dedieu G, 2011: Assessing the robustness of Random Forests to map land cover withhigh resolution satellite image time series over large areas. Remote Sensing of Environment 187 (2016) 156–168.

Pham M. T., Mercier G., and Michel J., 2016: Change detection between SAR images using a point wise approach and graph theory, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 54, no. 4, pp 17.

PNUD/UNOPS, 1998 : Monographie de la province du Nord Kivu.

Poss R., 1996 : Étude morpho pédologique du nord du Togo à 1/500 000. ORSTOM, notice explicative n°109, Paris, 142 p.

Plumptre, A.J., M. Bengana, T. Davenport, C. Kahindo, R. Kityo, E. Ndomba, D. Nkuutu, I. Owiunji, P. Ssegawa et G. Eilu, 2003: The Biodiversity of the Albertine Rift, Albertine Rift

Technical Reports N-3. Wildlife Conservation Society, Kampala, Uganda. www.albertinerift.org, DOI : 10.1016/j.biocon.2006.08.021

Prakoso K.,U., 2003 : Tropical Forest Mapping using Multiband Interferometric and Polarimetric SAR Data. PolInSAR workshop, ESRIN, Rome, Italie.

Prentice I.C., Monserud R.A., Smith T.M. and Emanuel, W.R., 1992: Modeling large-scale vegetation dynamics, in: Solomon, A.M. and Shugart, H.H (eds), Vegetation Dynamics and Global Change, Chapman and Hall, New York.

Quegan S., Yu, J. J., 2001: Filtering of multichannel SAR images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39 (11), 2373–2379.

Ramade F., 2011 : Introduction à l'écochimie : Les substances chimiques de l'écosphère à l'homme ; 2 vol., 951 p.

Régniers O., 2014 : Méthodes d'analyse de texture pour la cartographie d'occupations du sol par télédétection très haute résolution. Thése de doctorat, Université de Bordeaux.

Ren W., Song J., Zeng J., and Zhang X., 2016: A novel asymmetrical probability density function for modeling log-ratio Sar images," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 13, no. 3, pp. 369–373.

Roger Fjortoft, 1999 : Segmentation d'Images Radar par Détection de Contours, Thèse de Doctorat, CESBIO.

Rosenfield, G., Fitzpatrick-Lins, K. and Ling, H. 1982: Sampling for the- Matic accuracy testing. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 48(1):131–137.

Rosenquist A., Shimad M., Ito N., Watanabe M., 2007: ALOS PALSAR: a pathfinder mission for global-scale monitoring of the environment. IEEE Trans Geosci Remote 45 (11): 3307-3316.

Rosillo-Calle F., 2007: Overview of biomass energy. The Biomass Assessment Handbook: Bioenergy for a sustainable Environment. Earthscan, London.

Rundquist C., Donald C., Luoheng Han. 1997: Comparison of NIR/RED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: A case study in a turbid reservoir. Remote Sensing of Environment, Volume 62, Issue 3, December 1997, pp 253-261.

Salajanu, D. et Olson, C.E. 2001. The significance of spatial resolution – Identifying forest cover from satellite data. Journal of Forestry 99: 32–38.

Sandwell D.T., Myer D., Mellors R., Shimada M., Brooks B. & Foster J., 2008: Accuracy and resolution of ALOS interferometry: vector deformation maps of the Father's Day intrusion at Kilauea, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing; 46(11):3524:3534.

Schnell R., 1971: Introduction à la phytogéographie des pays tropicaux; Paris, Gauthier-Villars, 2 vol., 951 p.

Schreier G., 1993, SAR geocoding: data and systems**,** Wichmann Verlag, Karlsruhe.

Sessi A., 1998. Plan de gestion de la réserve de faune de Togodo (Site Ramsar), Comité National des Zones humides, direction des Parcs Nationaux des réserve de faune et de chasses, Ministère de l'Environnement et de la Protection Forestière, Lomé, Togo 52 p.

Shimada M., Itoh T., Motooka T., Watanabe M., Shiraishi T., Thapa R., Lucas R., 2014: New global forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007–2010), j.rse.2014.04.014, 13-31 Pages.

STROZZI T., DAMMERT P., WEGMÜLLER U., MARTINEZ J.M., BEAUDOIN A., ASKNE J. et HALLIKAINEN M., 1999: 'Forest mapping with SAR interferometry', in : ESA ed., Earth Observation Quarterly, n°62, pp. 17-20.

Steiniger T., 2000: A comparison of the IGBP DISCover and University of Maryland 1km global land covers products. International Journal of Remote Sensing 21 (6 and 7): 1365 – 1273.

Sumaiya M. N. and Kumari R. S. S., 2016: Logarithmic mean-based thresholding for sar image change detection," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 13, no. 11, pp. 1726–1728.

Thapa R, Shimada M., Itoh T., Motooka T., Watanabe M., Shiraishi T., Lucas R., 2014: New global forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007–2010), j.rse.2014.04.014, 13-31 Pages.

Thiel, 2011: PECS SAR Remote Sensing Course - SAR Theory and Applications to Forest Cover and Disturbance Mapping and Forest Biomass Assessment. ESA / University of Szeged / DLR, 13–17.

Torbick N., Chowdhury D., Salas W., et Qi J., 2017: Monitoring Rice Agriculture across Myanmar Using Time Series Sentinel-1 Assisted by Landsat-8 and PALSAR-2. Remote Sensing, 119; https://doi.org/10.3390/rs9020119

UICN 1994: Catégories de l'UICN pour les Listes Rouges. Union Mondiale pour la Nature (UICN), 22 p.

UICN, 2008 (a): Evaluation de l'efficacité des aires protégées, Aires protégées de la République du Togo. 41 p

UICN, 2008 (b): Parcs et Réserves du Togo, Evaluation de l'efficacité de la gestion des Aires protégées, PACO, 44p.

Ulaby F. T., Held D., Dobson M. C., Mc Donald K. C., Senior T. B. 1987: Relating polarization phase difference of SAR singles to scene properties. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 25 (1) 83-91.

Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K., 1982: Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Volume II: Radar Remote Sensing Scattering and Emission Theory. Arctech House, Inc., Norwood, MA, USA.

Ulaby F.T. and Elachi C., 1990: Radar Polarimetry for Geoscience Applications. Artech House, Norwood, MA.

Van Genderen J. and Lock B., 1977: Testing land use map accuracy. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 43:1135–1137.

Vapnik, V. N., 1998: Statistical learning theory. 1 edn, Wiley.

Wang Y., Du L., and Dai H., 2016: Unsupervised Sar image change detection based on sift key points and region information," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 13, no. 7, pp. 931–935.

Vanden Weghe J.P., Franssen J., Kalambay G., Kramkimel J-D., Musibono D., 2005 : République Démocratique du Congo**,** Profil Environnemental, Contrat n° 2005/105393.

WWF-Goma, 2014: Evolution de l'occupation du sol dans l'Est de la RDC, rapport de projet Ecomakala, 45p.

Xie Y., Sha Z., Yu M., 2008: Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. Journal of Plant Ecology, Volume 1, March 2008, P 9–23, https://doi.org/10.1093/jpe/rtm005.

Xu J et Wu Z., 2012: Research on Geometrie and Radiometrie Correction Order and Its Impact for Remote Sensing Image. XXII Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Melbourne Convention and Exhibition Centre, Australia, 25 August-l September 2012).

Zapfack, L. 2005. Impact de l'agriculture itinérante sur brûlis sur la biodiversité végétale et la séquestration du carbone. Thèse d'Etat, Université de Yaoundé I, Cameroun, 225 p.

Zhang, T., 2001: An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-Based Learning Methods. AI Mag. 22, 103.

Webographie:

http://forestry.about.com/

http://www.cbd.int/countries/

http://www.ipcc.ch

http://www.fws.gov/international

http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/dataset_index.htm

http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/palsar_fnf/fnf_index.htm

http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/palsar_fnf/fnf_index.htm

https://rus-training.eu/course/sar-02-equation-radar-pour-la-teledetection

https://earthexplorer.usgs.gov/.

http://www.fao.org/waicent/faoinfo/forestry/wforcong/defaut.htm/.

www.wdpa.org.

www.landcover.org.

http://www.google.fr/intl/fr.

http://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/limite geographique /teledetection /fondements/ 1718.

www.divagis.org.

www.albertinerift.org