



Cartographie de la phénologie des forêts humides en Afrique centrale

Gaëlle Viennois

► **To cite this version:**

Gaëlle Viennois. Cartographie de la phénologie des forêts humides en Afrique centrale. 2011.
<halsde-00675851>

HAL Id: halsde-00675851

<https://hal.archives-ouvertes.fr/halsde-00675851>

Submitted on 2 Mar 2012

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.

UMR AMAP- Bd de la Lironde TA A51/PS2- 34398 Montpellier cedex 5



Cartographie de la phénologie des forêts tropicales humides en Afrique centrale

Mémoire du projet CEA d'AgroParisTech en Géomatique

Gaëlle Viennois

01/12/2011

Responsable : Nicolas Barbier

Tuteur CEA : Roberto Meloni

Rapporteurs : Marie Christine Bois & Camille Lelong



Résumé

L'objectif de ce projet est de cartographier les forêts tropicales humides selon un axe phénologique dans une zone d'intervention prioritaire située en Afrique Centrale. Nous présentons une méthode originale basée sur une procédure itérative multi-échelles allant de l'échelle locale (GeoEye-1, SPOT-5) à l'échelle régionale (MODIS). Pour la première fois, nous montrons que la variation annuelle de l'indice de végétation EVI issu des données Hyper-temporelle MODIS permet de distinguer et d'identifier les forêts mixtes selon un comportement phénologique. La valeur moyenne annuelle EVI est en effet liée à la structure de la canopée et à l'orientation des feuilles, alors que la variation saisonnière (EVI_{SH}-EVI_{SS}) répond au cycle phénologique foliaire. Nous montrons aussi dans cette étude que la proportion de feuillus estimée sur les images SPOT-5 permet de valider les différents comportements phénologiques trouvés avec l'analyse d'EVI. Finalement, l'aspect en mosaïque des forêts obtenu sur la carte, est en adéquation avec l'aspect des forêts de l'Afrique Centrale, caractérisé par un mélange ou une juxtaposition de groupements d'espèces de type sempervirents et de type semi-sempervirents.

Mots clés: Phénologie foliaire, cartographie, décidue, MODIS/EVI, images THR, Afrique Centrale, Forêts tropicales humides, quantification, classification, sempervirent.

Sommaire

| | | |
|-------|-------------------------------------------------|----|
| 1 | Introduction | 4 |
| 2 | Matériel et Méthodes | 6 |
| 2.1 | Matériel | 6 |
| 2.1.1 | Site d'étude | 6 |
| 2.1.2 | Images satellites | 7 |
| 2.2 | Méthodes..... | 11 |
| 2.2.1 | Détermination des zones de référence ROI | 11 |
| 2.2.2 | Classification..... | 13 |
| 2.2.3 | Estimation de la proportion de décidus..... | 13 |
| 3 | Résultats | 14 |
| 3.1 | Geoeye..... | 14 |
| 3.2 | SPOT..... | 16 |
| 3.3 | MODIS..... | 17 |
| 3.4 | Confirmation des types forestiers trouvés | 19 |
| 3.5 | Carte issue de l'image MODIS | 21 |
| 3.6 | Validation de la proportion de décidus | 22 |
| 4 | Discussion | 23 |
| | Remerciements..... | 26 |
| | Bibliographie | 27 |
| | Annexes..... | 29 |
| 1- | Séparabilité des ROIs..... | 29 |
| 2- | Matrice de confusion | 36 |

1 Introduction

L'Afrique centrale représente le second plus grand massif de forêts tropicales humides (FTH) au monde, soit près de 30 % de la couverture forestière mondiale. Les FTH ont une importance mondiale. Elles sont des réservoirs de la biodiversité et jouent un rôle essentiel dans le cycle du carbone [1]. Avec la déforestation, on observe un déclin rapide de la couverture forestière tropicale avec pour conséquence une diminution du stock de carbone, et une menace des écosystèmes. La réponse de la végétation terrestre aux changements environnementaux est donc au centre des prévisions des futurs niveaux de carbone atmosphérique [2]. Cependant, la région de l'Afrique centrale a connu relativement peu d'études scientifiques systématiques.

Dans cette étude, nous nous intéresserons à une zone d'intervention prioritaire située à la frontière du Congo, Sud Cameroun et Nord Gabon appelée zone TRIDOM (transfrontalier trinational Dja-Odzala-Minkebe Central African Regional, Program for the Environnement, CARPE, [3]) défini comme cible d'un projet prioritaire de recherche de l'IRD intitulé « Changements globaux, biodiversité et santé dans les forêts tropicales humides en Afrique Centrale ». Cette zone est composée de forêts denses humides intactes non encore fragmentées, riches en biodiversité (près de 270 espèces/hectare, [4]), et peu peuplée. Les réserves d'espace et les ressources naturelles y sont considérables. Ces forêts sont menacées par des déforestations pour l'exploitation des ressources naturelles existantes telles le bois, le minerais ou encore le combustible, ce qui contribue à la perte directe de sa biomasse et de sa diversité [4]. Il devient donc urgent de pouvoir faire un premier état des lieux de cette zone.

Cette zone TRIDOM est composée de forêts denses humides, parmi lesquelles plusieurs formes, différentes par leur degré d'hygrophyllie et par leurs espèces caractéristiques, ont pu être distinguées. Ces forêts, de types ombrophiles, peuvent être différenciées selon le caractère plus ou moins caducifolié ou sempervirent des espèces qui la composent [5]. La forêt ombrophile sempervirente se caractérise par des essences à feuillage toujours vert. A l'inverse, la forêt décidue se caractérise par la chute des feuilles simultanée. La forêt ombrophile semi-décidue se caractérise par un mélange d'essences à feuillage toujours vert et d'essences à feuillage caduc. Cependant, la classification de la forêt ombrophile guinéo-congolaise dans un type ou l'autre est malaisée. Cela est dû au fait que la variation dans la composition floristique, la physionomie et la phénologie est graduelle et continue et au fait que la distribution de nombreuses espèces est en corrélation imparfaite avec les facteurs du milieu [5].

Ces forêts sont difficiles à étudier : problème d'accès au site d'étude et d'échantillonnage des arbres qui constituent leur canopée. Les récentes avancées en télédétection permettent de contourner ces problèmes. L'acquisition d'images satellites de grandes aires géographiques et d'informations spectrales associées à celles-ci rend les investigations moins limitées dans le temps et l'espace que la prospection sur le site d'étude. La télédétection offre différentes résolutions spatiales et temporelles. Par exemple, il existe des images satellites à très haute

résolution spatiale et basse résolution temporelle permettant de différencier visuellement les peuplements voir même de distinguer à l'œil nu la limite des couronnes des émergents. D'autres images sont au contraire à basse résolution spatiale mais à haute résolution temporelle (car acquises quotidiennement) et permettent d'avoir un suivi régulier du paysage mais pas de distinguer visuellement les arbres individuels. L'observation journalière des forêts tropicales à faible résolution sur une large couverture terrestre permet d'observer les changements produits et la détection des patterns de phénologie [6].

La phénologie des arbres tropicaux, ou apparition d'événements périodiques tels que la période de croissance des feuilles (caractère sempervirent) ou la chute des feuilles (caractère décidu) est déterminée par les variations saisonnières du climat tropical [7]. Wright et Van Schaik [8] décrivent des grands types de comportements phénologiques en fonction de la saisonnalité de la radiation solaire et de celle des précipitations. Ce comportement décidu des forêts est un attribut important des forêts tropicales car il reflète les conditions climatiques. La perte partielle ou totale des feuilles pendant une partie de l'année indique que la productivité saisonnière est réduite. Pouvoir quantifier et cartographier la déciduité dans les forêts tropicales est un enjeu important pour mieux comprendre les propriétés de la canopée comme le recyclage du carbone ou la teneur en chlorophylle.

A l'heure actuelle, il n'existe qu'une seule carte phytogéographique du Cameroun de référence réalisé par Letouzey en 1985 [9] sur la base de photointerprétation d'images aériennes (1 :50 000). Il décrit, sur la base de la reconnaissance visuelle et texturale, des forêts primaires de type sempervirentes (feuillage persistant et toujours vert), semi-décidues (feuillage caduc) ou "mixtes", des peuplements de *Gilbertiodendron dewevrei*, des forêts secondaires à *Musanga cecropioides* et des forêts inondées ou inondables (notamment les Raphiales marécageuses).

Le Project ESA GlobCover [10] développe des cartes de couverture du sol en utilisant les images du capteur MERIS 2009 de résolution 300 m. Par classification spectro-temporelle, la carte, à l'échelle mondiale, différencie les forêts ombrophiles, les forêts inondées, les savanes ...

Hansen [11] quant à lui, a cartographié les forêts des non forêts dans le bassin du Congo via une méthodologie croisant les produits Vegetation Continuous Field de MODIS avec des acquisitions multitemporelles Landsat.

A l'heure actuelle, il n'existe pas de capteur capable de distinguer avec précision les forêts semi-décidues des forêts sempervirentes. Mais par l'intermédiaire d'indices de végétation, on peut mesurer les événements phénologiques nous informant sur les tendances et la variabilité d'un paysage entier. En effet, les individus defeuillés n'ont pas le même comportement spectral que les couronnes feuillées, ils sont alors différenciables sur les images de télédétection [12]. La capacité de mesurer la proportion de décidus apparaît donc intéressante pour différencier les types de forêts et fournit souvent l'axe principal de classification de la végétation [6]. Des résultats récents en Amérique du Sud basés sur des données optiques hyper-temporelles mettent en évidence la possibilité de quantifier les variations saisonnières et inter-annuelles du couvert

forestier (frondaison et / ou l'activité photosynthétique) en utilisant des indices de végétation (Bradley[13], Huete [14]).

Nous nous proposons donc de mettre au point une méthode pour cartographier les principaux types forestiers dans la zone TRIDOM sur la base de l'étude de la phénologie des forêts. Pour ce faire, nous utiliserons des images satellites multi-résolutions allant de l'échelle locale (GeoEye-1, SPOT-5) à l'échelle régionale (MODIS). Les zones d'entraînement seront identifiées sur une couverture SPOT-5 et GeoEye-1 puis seront mises en relation avec l'image MODIS. Nous tenterons de distinguer et cartographier les différents peuplements sur la base de la phénologie apportée par la haute résolution temporelle de l'image MODIS. Enfin, nous tenterons d'estimer la proportion des décidus.

2 Matériel et Méthodes

2.1 Matériel

2.1.1 Site d'étude

Le complexe transfrontalier trinational Dja-Odzala-Minkebe (TRIDOM) s'étend sur le Congo, le Gabon et le Cameroun (Figure 1). Il couvre une superficie de 147.000 km² (7,5% du Bassin du Congo) et comprend sept aires protégées (25% de la superficie). Il est localisé entre les latitudes 3°29'53''-0°26'28''N et les longitudes 11°51'54''-15°57'21''E. Ce complexe est situé sur un plateau dont l'altitude est comprise entre 300 et 1.000 mètres. La majeure partie du paysage repose sur des roches archéennes de 3.2 milliards d'années [4]. Les monts Bélinga et Minkébé au Gabon appartiennent à une ceinture de roches vertes et de sillons ferrifères âgée de 2.8 à 3.2 milliards d'années. La partie congolaise comprend au nord des plateaux archéens. Tout au sud, ce paysage se termine par les extensions du plateau des Batéké, [4]. Ce complexe, situé à peu près sur l'équateur, bénéficie d'un climat tropical bimodal avec deux saisons sèches centrées sur janvier et juillet, et deux saisons des pluies, centrées sur octobre et avril/mai. Les mois «secs» sont au nombre de 4 à 5. La pluviométrie annuelle est comprise entre 1.600 et 2.000 mm, [4].

La majeure partie du paysage est couverte de forêts denses humides qui, d'après la classification établie par White [15], correspondraient à la région phytogéographique Guinéo-congolaise constituée essentiellement par des forêts de type ombrophile.

La structure de ces forêts denses humides contient plusieurs strates. Les arbres de la strate supérieure, appelés « émergents », peuvent atteindre une hauteur de 40 m. Leurs cimes sont le plus souvent discontinues. Ces grands arbres recouvrent une strate continue d'arbres de moyenne grandeur. Puis, une 3^{ème} strate arborescente inférieure comporte de petits arbres dont la physiologie (et notamment la photosynthèse) s'accommode de conditions lumineuses moins favorables. Enfin, la dernière strate herbacée est très éparse, constituée de touffes de graminées sciaphiles à larges feuilles. Des lianes sont plus ou moins nombreuses selon les types forestiers [16].

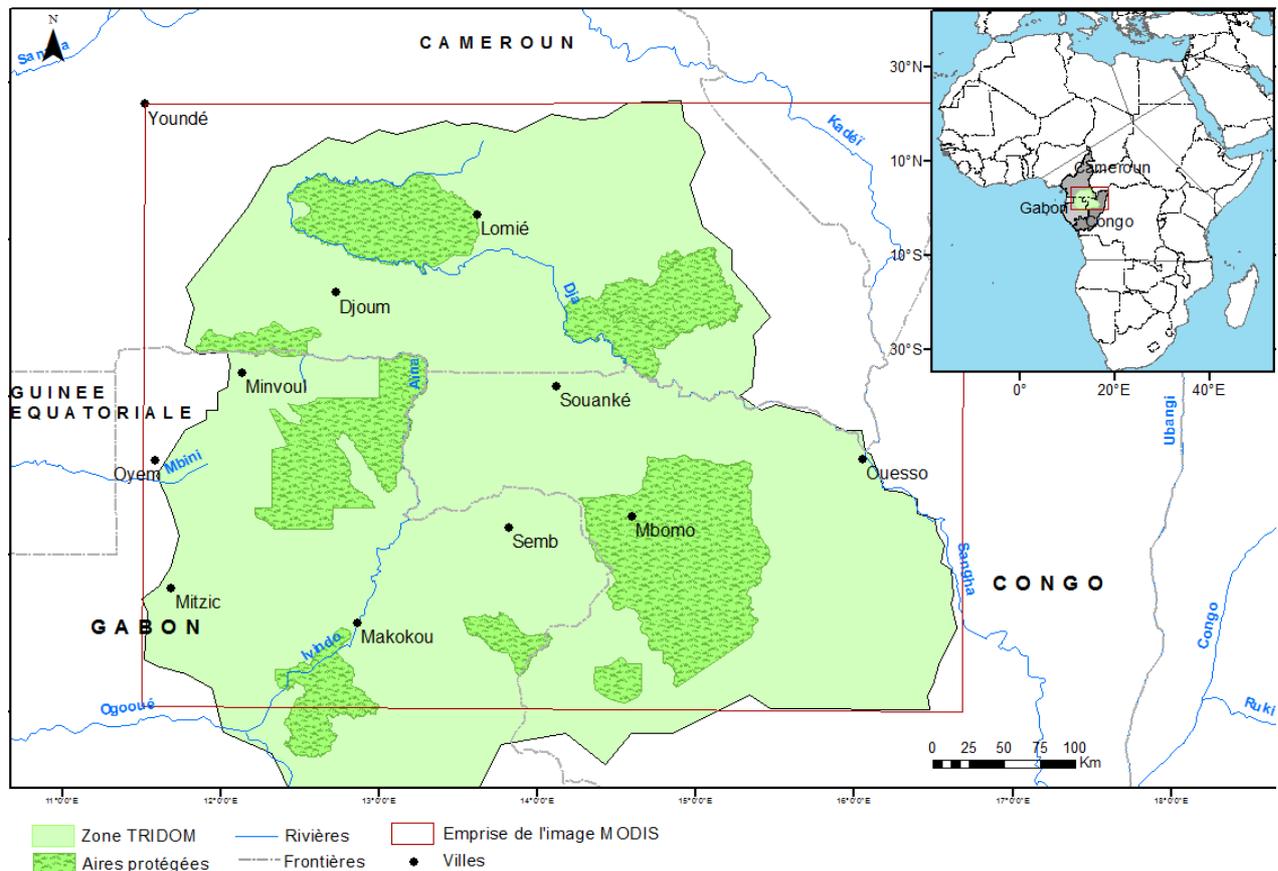


Figure 1 : localisation de la zone d'étude TRIDOM

2.1.2 Images satellites

Nous avons utilisé trois types d'images satellites (SPOT-5 ©CNES, GeoEye-1 et MODIS) de résolutions spatiales et temporelles différentes, les données MODIS possédant la plus haute résolution temporelle (journalière) mais au prix d'une résolution spatiale faible (250 m).

A l'inverse, les données des images GeoEye-1 et SPOT-5 présentent une résolution spatiale plus élevée (0.5 m et 10 m respectivement) mais sont beaucoup plus coûteuses au km², rendant leur acquisition régulière impossible. Les principales caractéristiques des images sont résumées dans la table 1.

| Caractéristiques | GeoEye-1 | SPOT-5 ©CNES | MODIS (MOD13Q1) |
|----------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Nombre d'images acquises | 4 | 21 | 250 |
| Période prise de vue | Janvier à Mars 2011 (période sèche) | Novembre à Février de 2006 à 2009 (période sèche) | Tous les 16 jours de Janvier 2000 à Décembre 2010 |
| Surface d'une image (km ²) | 100 | 3780 | 250 000 |
| Résolution spatiale (m) | 0.5 | 10 | 250 |
| Résolution temporelle | 1 jour | 1 jour | 10 ans |
| Bandes spectrales (µm) | b1 : 0.45-0.51 (bleu) | b1 : 0.50-0.59 (vert) | b2 : EVI 16 days |
| | b2 : 0.51-0.58 (vert) | b2 : 0.61-0.68 (rouge) | b3 : VI Quality detailed 16 days |
| | b3 : 0.65-0.69 (rouge) | b3 : 0.78 -0.89 (PIR) | b4 : 0.62-0.67 (rouge 16 days) |
| | b4 : 0.78 -0.92 (PIR) | b4 : 1.58 -1.75 (MIR) | b5 : 0.841-0.876 (PIR 16 days) |
| | | | b6 : 0.459-0.479 (bleu 16 days) |
| | | | b7 : 1.23-1.250 (MIR 16 days) |
| | | b12 : pixel reliability 16 days | |

Table 1 : caractéristiques des images satellites.

2.1.2.1 Données MODIS

Les données de réflectance proviennent du produit MOD13Q1 du capteur spectroradiomètre imageur à résolution moyenne (MODIS) du satellite TERRA. La zone d'étude est recouverte entièrement par la tuile h19v08, soit près de 250 000 km² (voir Figure 1). Les jeux de données sont téléchargeables sur le site de la NASA LPDACC. Les données MOD13Q1 sont agrégées avec un pas de 16 jours sur la période 2000-2010 et ont une résolution spatiale de 250 m. Pour chaque période de 16 jours, un fichier au format HDF est obtenu. Ce fichier contient 12 couches différentes (codées sur 16 bits) dont nous avons extrait sous matlab les données de réflectance dans le rouge, le proche infra-rouge, le bleu, le moyen infra-rouge, un indice de végétation dérivé, ainsi que des informations afférentes à la qualité des données (b3 et b12, quality et pixel reliability, respectivement), voir Table 1.

L'indice de végétation amélioré (EVI) répond aux variations structurales de la canopée, incluant l'indice de surface des feuilles (LAI) et le type de canopée [17]. Cet EVI présente une sensibilité améliorée dans les régions de biomasse élevée, comme les forêts tropicales [18]. Il est calculé en

prenant la valeur maximale de chaque pixel de l'image pour une période de 10 à 16 jours et est relativement indépendant vis-à-vis de l'effet des perturbations atmosphériques (grâce à l'utilisation de la bande bleue et à l'agrégation temporelle d'acquisitions multiples).

$$EVI = 2.5 \left(\frac{PIR - R}{PIR + 6R - 7.5B + 1} \right) \quad \text{Où } PIR = \text{Proche Infra-rouge}$$

R = Rouge
B = Bleu

Pour cartographier l'occupation du sol et les types de végétation sur la base des valeurs de réflectance, il est nécessaire d'utiliser des données calibrées. Les réflectances de surface (corrections des effets atmosphériques et de réflectance directionnelle) sont en principe fournies dans le produit MOD13Q1. Cependant, la présence quasi permanente de nuages et de taux d'aérosols importants corrompt généralement les données, même après agrégation temporelle (16 jours). En raison des variations phénologiques de la végétation, il n'est pas possible de reconstituer une image en prenant simplement pour chaque pixel une valeur quelconque de réflectance surfacique valide. Nous avons donc tenté d'obtenir une couverture homogène de réflectance pour les différentes bandes spectrales en moyennant les valeurs de réflectance valides obtenues pendant dix ans pour la principale saison sèche (15 Novembre au 15 Février) et pour la saison des pluies (15 Février au 15 Novembre). On a ainsi pu reconstituer sous Matlab une image finale moyenne composée de 10 bandes : 5 bandes (R, PIR, MIR, EVI, Bleu) correspondant à la saison sèche et 5 bandes (R, PIR, MIR, EVI, bleu) de la saison humide couvrant une surface de 250 000 km².

Cependant, l'ouest de la zone d'étude continue de présenter des anomalies spectrales à cause de la nébulosité plus importante.

2.1.2.2 Images SPOT-5 : (Données SPOT/Programme ISIS. Copyright CNES)

Nous disposons de 21 images d'archives de SPOT-5 acquises pendant la saison sèche, grâce au programme CNES-ISIS, qui couvrent partiellement (environ 50%) la zone d'étude. Chaque image SPOT-5 couvre une superficie proche de 4000 km² (voir Table 1). Ces images sont composées de 4 bandes : bande vert 0.50-0.59 μm, bande rouge 0.61-0.68 μm, bande PIR 0.78-0.89 μm et bande MIR 1.58-1.75 μm, de résolution 10 m. Les données sont codées en compte numérique sur 8 bits. Les perturbations atmosphériques, surtout présentes dans la bande rouge, sont éliminées sous ENVI par un filtre passe-haut (transformée de Fourier). Les histogrammes radiométriques de chaque bande ont été standardisés par l'écart à la moyenne sous Matlab.

2.1.2.3 Images GeoEye-1

Nous disposons de 4 images multispectrales du satellite GeoEye-1, acquises pendant la saison sèche, recouvrant chacune une surface de 100km² de la zone d'étude (voir Table 1) et dont la résolution en multispectral (2 m) a été améliorée à 0,5 mètre via un procédé de pan-sharpening

sous le logiciel ENVI. L'algorithme *pan-sharpening de Brovey* [19] permet de fusionner en une seule image à haute résolution les images prises à différentes résolutions. En règle générale, deux images sont fournies en paramètre, une image panchromatique à très haute résolution (ici, 0.50 m) et une image multispectrale à haute résolution (ici, 2 m). L'algorithme *pan-sharpening* permet la création d'une image multispectrale à très haute résolution (0.5 m) à partir de ces deux images. Au final, on obtient une image composée de 4 bandes : bleu (0.45-0.51 μm), vert (0.51-0.58 μm), rouge (0.655-0.69 μm) et PIR (0.780-0.920 μm) de résolution 0.5m. Ces données sont codées en compte numérique sur 11 bits.

Toutes les images ont été géo-référencées et ortho rectifiées sous ENVI avec la mosaïque GeoCover Landsat [20] et la topographie SRTM [21]. Les images GeoEye-1 et SPOT-5 sont analysées avec la composition colorée RGB des bandes rouge, PIR et verte. La Figure 2 présente les 21 images SPOT-5 et les 4 images GeoEye-1 superposées à l'image MODIS finale obtenue.

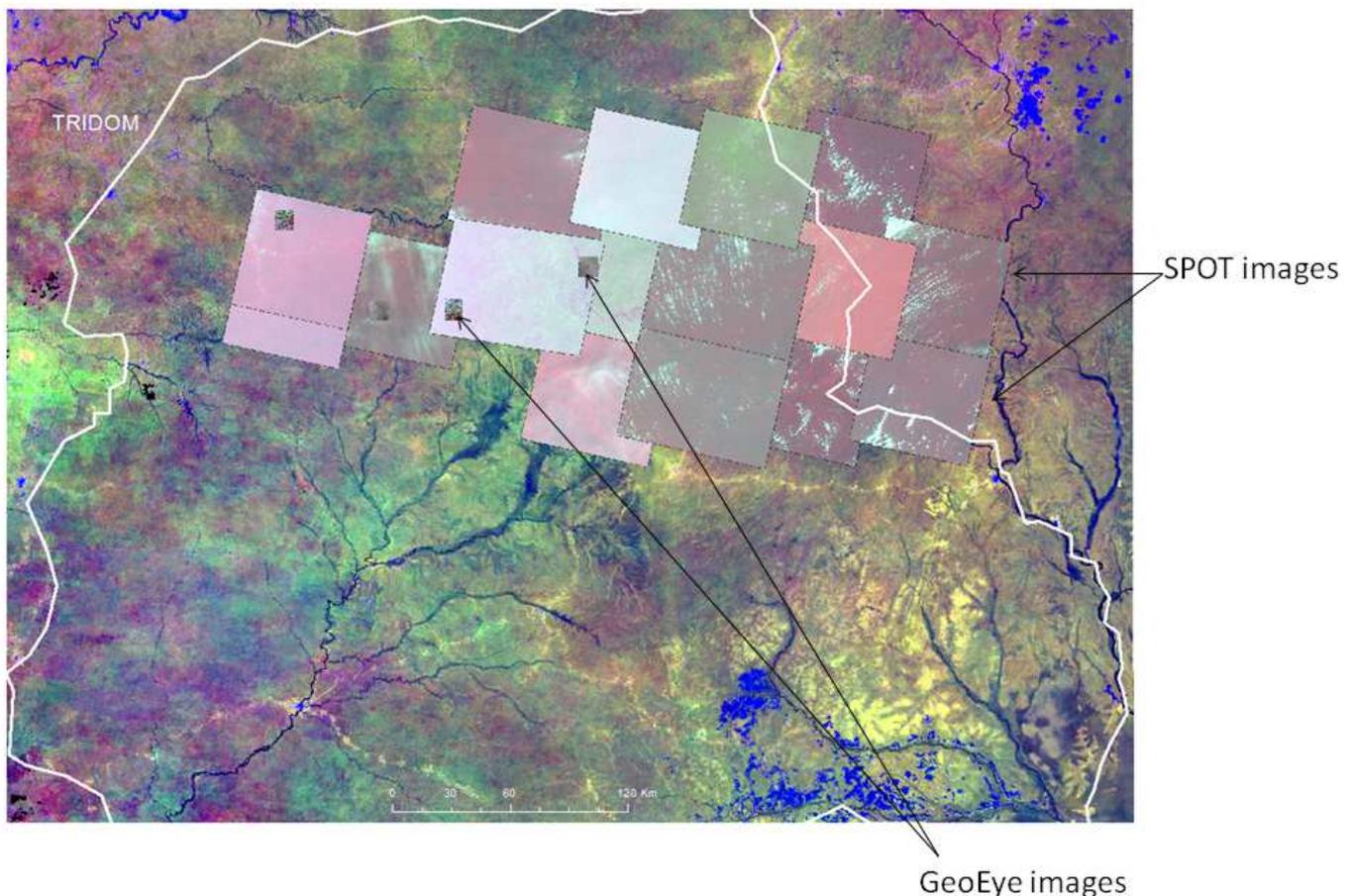


Figure 2 : Plan des 21 images SPOT-5 ©CNES (2006-2009), Distribution Spot Image SA et des 4 images GeoEye-1 couvrant l'image MODIS finale dans la zone TRIDOM.

2.2 Méthodes

Nous avons tenté d'identifier les différents types d'occupation du sol du site d'étude par classification supervisée par maximum de vraisemblance à l'échelle régionale couverte par l'image MODIS. Comme l'accessibilité au complexe TRIDOM est difficile, nécessitant une mission de 10 jours pour faire des relevés de terrain pour seulement 2 parcelles, il n'a pas été possible d'avoir assez de zones d'entraînement issues des données terrain pour réaliser la classification dans le temps imparti pour ce mémoire. De plus, il n'est pas possible d'analyser directement l'image MODIS obtenue (10 bandes), la résolution du pixel étant de 250 m empêchant toute interprétation visuelle. La définition des zones d'entraînement (ROIs) pour la segmentation des données MODIS a été réalisée grâce à une procédure itérative multi-échelle. Un diagramme de la méthodologie est présenté dans la Figure 3.

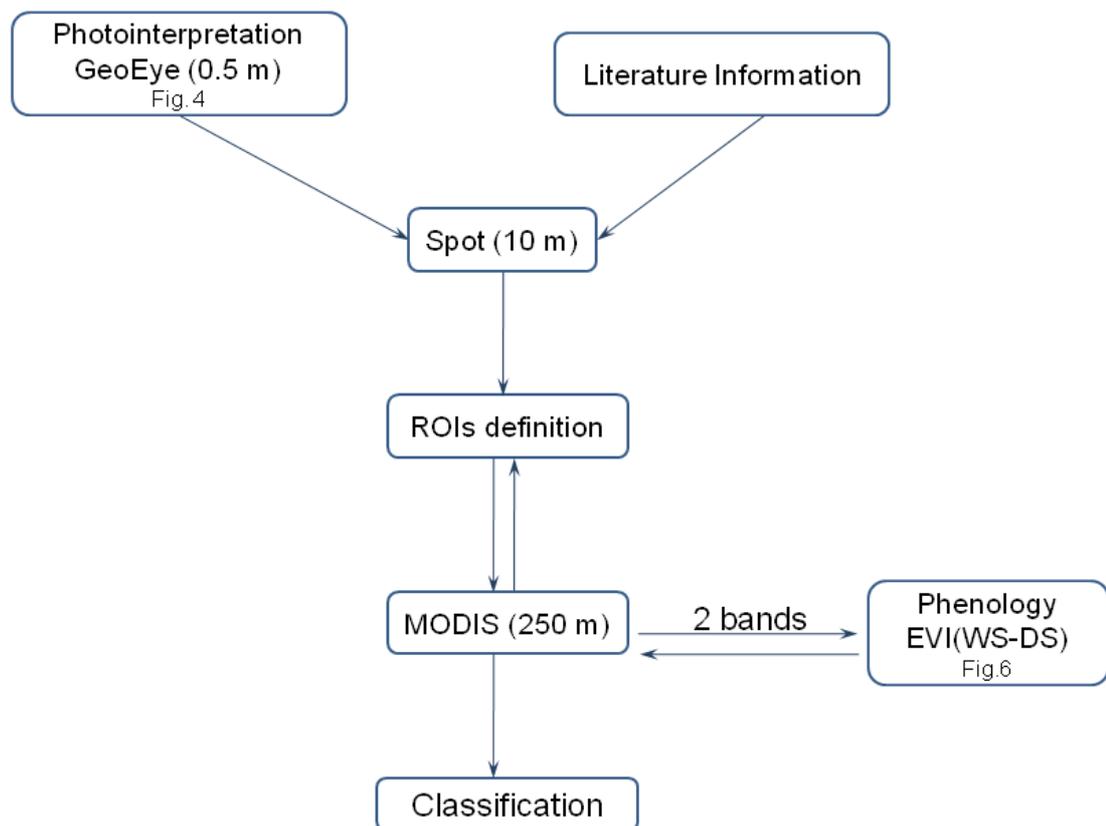


Figure 3 : organigramme des méthodes utilisées pour définir les types de forêts sur l'image MODIS

2.2.1 Détermination des zones de référence ROI

2.2.1.1 Photo-interprétation des images GeoEye-1

Les images GeoEye-1 ont une résolution spatiale suffisante (0.5m) pour discerner les couronnes des arbres individuels ainsi que les branches défoliées. Ces données nous ont permis de palier au manque des données de terrain. La photo-interprétation a une longue tradition en matière de foresterie. De la même manière que Letouzey [9] a cartographié les types de végétation du Cameroun à partir de la photo-interprétation d'images aériennes au 1 :50 000, nous avons utilisé ces images pour discerner les types de forêts sur la base de la structure générale de la canopée (texture) et la proportion des arbres décidus au moment de l'acquisition des images (saison sèche).

2.2.1.2 Les images SPOT-5 pour établir les zones de références

La distinction des groupements forestiers est beaucoup moins aisée sur les images SPOT-5, mais ces dernières présentent l'avantage de couvrir une zone plus grande que celle des images GeoEye-1. Ces données, par leur échelle intermédiaire, sont donc intéressantes pour la mise en relation à large échelle avec l'image MODIS. En superposant ces images à celles de GeoEye-1 (grâce à un bon calage au préalable), nous sommes arrivés à reconnaître visuellement, sur la base d'informations spectrales et spatiales, les mêmes types de forêts que sur les images GeoEye-1.

Cependant, il était difficile de séparer les nombreuses formes de transition entre les forêts typiquement sempervirentes et les forêts décidues comme on pouvait les observer sur les images GeoEye-1. Or, c'est la proportion des arbres décidus qui permet de différencier les forêts dans un type ou l'autre. Il a donc fallu trouver un moyen pour estimer cette proportion de décidus. On sait servi des connaissances de Jensen [22]. Il décrit que selon les différents stades phénologiques sempervirent versus décidus, la variation de la réflectance d'un même peuplement végétal varie au cours des saisons. En effet, pendant la saison sèche, la sénescence de la végétation avec perte des feuilles conduisant à la « déciduité », se traduit par l'augmentation de la réflectance dans la bande spectrale rouge (0.61 - 0.68 μm) et la diminution de la réflectance dans la bande PIR. A l'inverse, le caractère phénologique feuillé se caractérise par une augmentation de la réflectance dans la bande PIR (0.78 - 0.89 μm) et a lieu pendant la saison humide. Sur la base de ces connaissances, nous avons analysé le comportement spectral des forêts dans les bandes rouge et PIR pour pouvoir classer ces forêts en type plus ou moins sempervirent ou décidu.

A l'issue de cette analyse, nous avons pu extraire différentes région d'intérêt (ROIs) correspondant aux différents types forestiers.

2.2.1.3 Détermination des zones de référence sur l'image MODIS

Nous avons projeté les ROIs précédemment extraites des images SPOT-5 sur l'image MODIS composée seulement des bandes EVI correspondant aux saisons sèche et humide, soit 2 bandes. En effet, Huete A. [18] a démontré que l'indice de végétation EVI pouvait être utilisé pour enregistrer les variations de structures végétales et les paramètres phénologiques en fonction du

rythme saisonnier annuel. Puis, nous avons calculé l'amplitude annuelle $EVI = EVI_{SH} - EVI_{SS}$ pour mesurer les variations de l'activité chlorophyllienne au cours du temps. En comparant les valeurs moyennes de cet indice avec chacune des ROIs projetées sur l'image MODIS (2 bandes), nous sommes arrivés à séparer les différents groupements forestiers. Puis nous avons analysé leur distribution spectrale dans l'espace de l'image MODIS finale à dix dimensions (correspondant aux dix bandes spectrales). Certaines classes, apparaissant encore hétérogènes (bimodales) ont été redessinées afin d'obtenir des classes homogènes. Puis, nous avons vérifié leur séparabilité sur l'image MODIS 10 bandes.

Enfin, les amplitudes annuelles ($EVI_{SH} - EVI_{SS}$) des différents types de forêts ont été évaluées en utilisant un test de Kruskal Wallis et un test post hoc sous le logiciel Statistica 8.

2.2.2 Classification

L'approche pixel à pixel est celle qui est la plus couramment utilisée pour la classification d'images optiques. Elle consiste à effectuer des calculs pour chaque pixel afin de les classer individuellement. Les classifications par maximum de vraisemblance se basent sur le calcul probabiliste pour chaque pixel d'être rattaché à une classe C_j plutôt qu'à une autre. Nous avons défini un seuil de rejet de 80 % en dessous duquel un pixel p ne sera pas classé dans la classe C_j . Les ROIs trouvées précédemment ont servi de zones d'apprentissage à partir desquelles le reste de l'image a été classée.

2.2.3 Estimation de la proportion de décidus

Nous avons estimé la proportion des couronnes décidues de la canopée sur les images SPOT-5 sur la base d'une combinaison de seuillage de la bande PIR (feuillé) avec la bande Rouge (décidue). Le seuillage pour chaque image SPOT-5 a été fait sous Arcgis et le résultat donne une valeur binaire au pixel. Le pixel prend la valeur 0 pour le caractère décidu et la valeur 1 pour le caractère feuillé. Ensuite ces pixels sont agrégés dans des zones correspondant aux pixels MODIS et par rapport aux classes préétablies. On a utilisé le test non paramétrique de Kruskal-Wallis pour voir si les populations de forêts sont différentes.

3 Résultats

3.1 Photo-interprétation des images GeoEye-1

A cette échelle, on a pu observer la texture, la composition et la couleur des couronnes des arbres et visualiser leur caractère feuillé/defeuillé allant même jusqu'à la distinction de branches dénudées. La composition colorée de l'image (bande PIR dans le canal vert, bande rouge dans le canal rouge et bande verte dans le canal bleu) nous a permis de différencier les forêts primaires ombrophiles (Figure 4). Les forêts ombrophiles de type décidu apparaissent rouges avec des arbres defeuillés où l'on peut apercevoir les branches dénudées ; on les nommera pour les besoins de l'étude, forêts mixtes 4 (FM4). Au contraire, les forêts ombrophile de type plutôt sempervirent sont recouvertes d'arbres feuillés avec de belles couronnes et présentent une couleur vert sapin, et sont nommées forêts mixtes 1 (MF1). Les forêts secondaires (YSF) sont à proximités des routes et des villages et sont composées d'espèces pionnières comme *Mussanga cecropioides* de couleur vert vif qui sont en plein développement pour reconquérir des cultures. On peut apercevoir des forêts ouvertes, qui semblent être des forêts dégradées où le sous bois est composé de liane de type *marantacea*, qu'on nommera open forest (OF). Enfin, on a également pu observer des forêts monodominantes à *Gilbertiodendron dewevrei* (GDF) ayant une texture bien différente des autres types forestiers, ce qui permet de les distinguer facilement.



Figure 4 : Extraits de différents groupes forestiers issus des images GeoEye : A:MF4 ; B:MF1 ; C:GDF ; D:YSF ; E:OF. La composition colorée de l'image est la suivante : la bande PIR dans le canal vert, la bande rouge dans le canal rouge et la bande verte dans le canal bleu.

3.2 Extraction des ROIs à partir des images SPOT-5

La couleur, la forme et la texture des objets ont permis de définir les classes thématiques suivantes : forêt secondaire YSF, forêt ouverte (OF), forêt monodominante à *Gilbertiodendron dewevrei* (GDF), bâti, rivières et forêts primaires ombrophiles (FM). Pour les forêts ombrophiles primaires (FM), on a utilisé les caractéristiques spectrales des images SPOT-5 pour classer le type de forêt primaire (FM) en type plutôt sempervirent (FM1) ou type plutôt décidu (FM4). En effet, en analysant la moyenne de valeurs des comptes numériques (CN) des ROIs correspondantes aux FM1 extraites des images SPOT-5, on observe une augmentation des CN dans le canal PIR parallèlement à une diminution des CN dans le canal rouge (Figure 5). Ceci est caractéristique des forêts sempervirentes. A l'inverse, pour les ROIs spécifiques des FM4 extraites de SPOT-5, la moyenne des valeurs des CN dans la bande rouge est supérieure à celle dans la bande PIR, caractéristique des forêts décidues. On observe les mêmes comportements spectraux typiques des forêts décidues et des forêts sempervirentes mentionnés par Jensen [22].

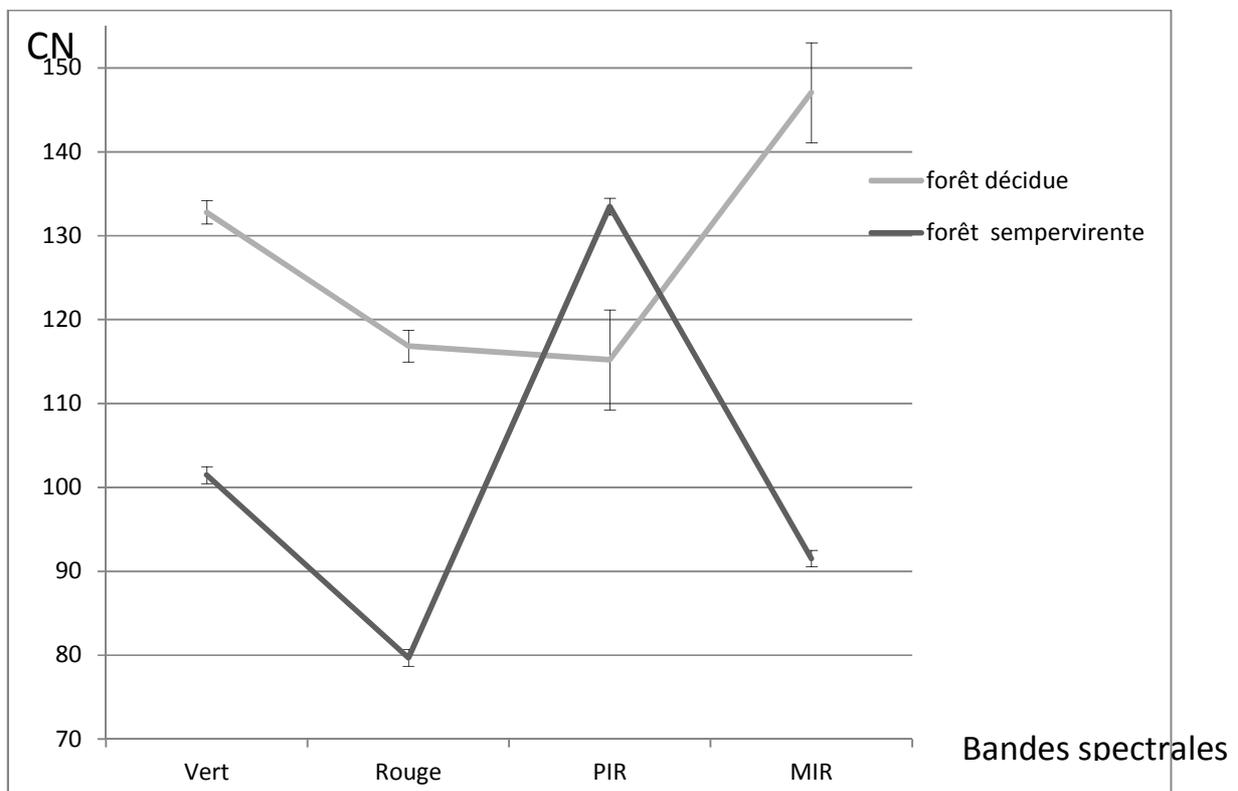


Figure 5 : comportement spectral des forêts de type sempervirent (FM1) versus forêt de type décidue (FM4). Moyenne des comptes numériques (CN) pour chaque bande spectrale des ROIs extraites d'images SPOT-5.

3.3 Détermination des zones d'apprentissage sur l'image MODIS finale

On voit sur la Figure 6 que les valeurs moyennes de l'EVI varient différemment durant les 2 saisons pour toutes les classes de forêts. Dans tous les cas, les valeurs moyennes de l'EVI pendant la saison sèche, sont plus faibles avec une diminution plus marquée pour les FM4, suggérant que ces forêts auraient une canopée décidue. Au contraire, les FM1 et les GDF2 montrent une faible diminution de la valeur moyenne de l'EVI durant la saison sèche, suggérant que ces forêts auraient une canopée moins décidue. L'amplitude annuelle ($EVI_{SH}-EVI_{SS}$) calculée pour mesurer la variation de l'activité chlorophyllienne au cours du temps confirme les différents comportements phénologiques des groupes forestiers. En effet, les MF4 et OF montrent une importante variabilité de l'activité chlorophyllienne au cours de l'année ($1127,53 \pm 104,968.24$ et 168.4 , respectivement, Figure 6). Au contraire, les FM1 et les GDF2 montrent des faibles variations de l'amplitude annuelle ($EVI_{SH}-EVI_{SS}$), donc une faible variabilité de l'activité chlorophyllienne (380.68 ± 85) traduisant une activité chlorophyllienne stable pendant l'année. Ceci confirme le comportement sempervirent de ces forêts.

Le test de Kruskal Wallis est significatif ($p < 0,0001$) c'est-à-dire qu'il y a une différence significative de l'amplitude annuelle ($EVI_{SH}-EVI_{SS}$) entre les types de forêts. Le test de comparaison post hoc montre que toutes les forêts sont différentes les unes des autres, exceptées les MF2 et MF3 qui sont différenciables sur les valeurs moyennes EVI prises séparément en saison sèche ou saison humide.

Ces résultats suggèrent donc que l'on peut distinguer les types de forêts sur la base du comportement phénologique et sur la différence de structure.

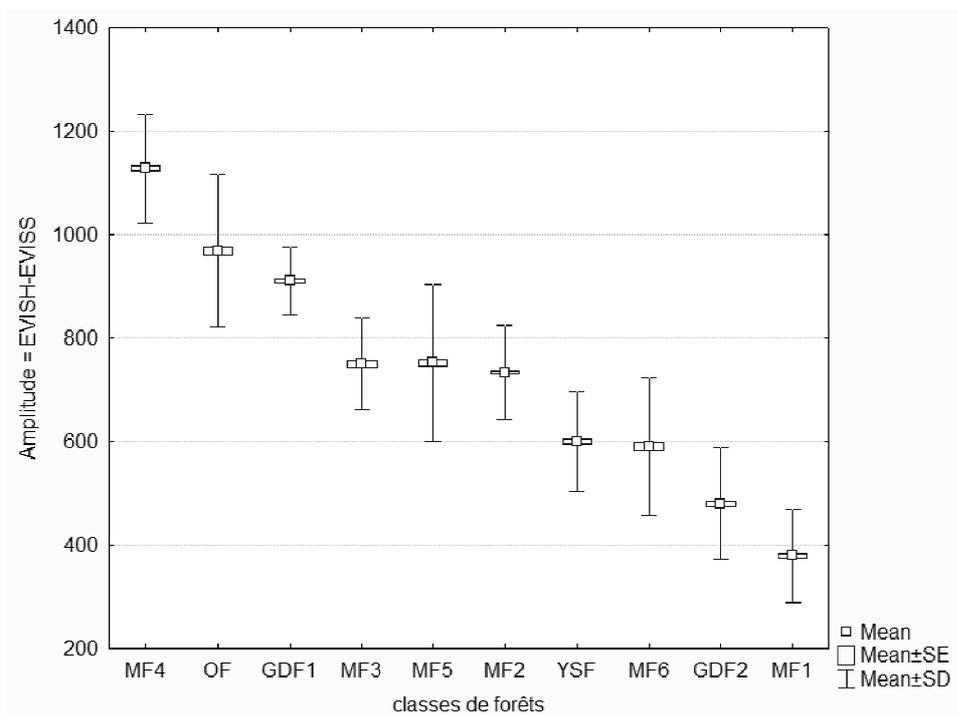
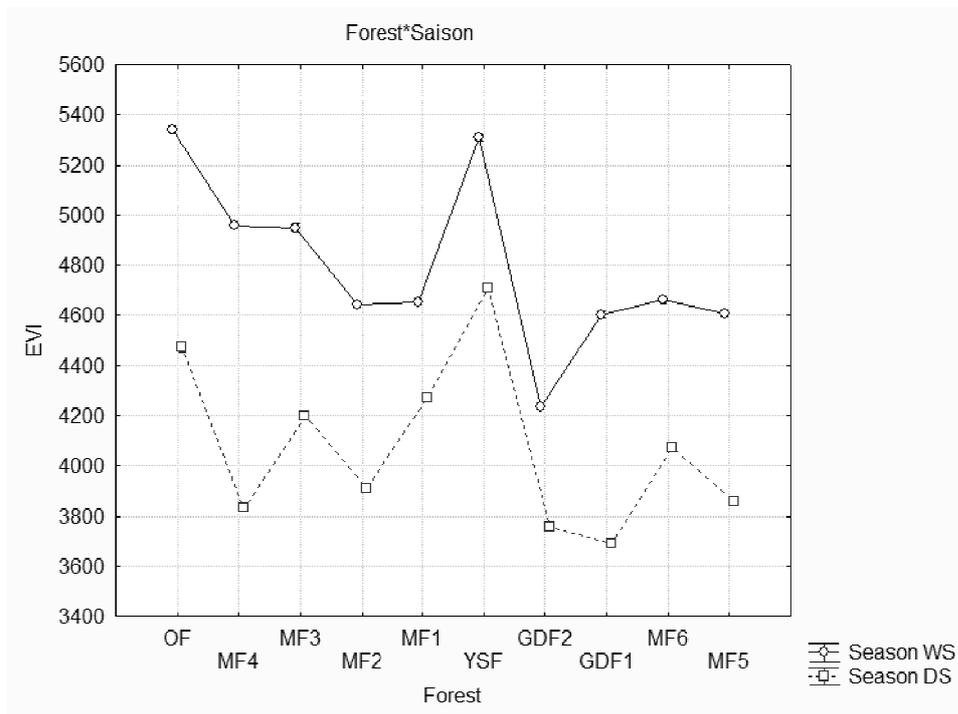


Figure 6 (A) Variation de l'indice de végétation EVI entre la saison sèche et la saison humide pour différent type de forêts (Moyenne EVI des ROIs extraites d'images Modis /classe). (B) Amplitude annuelle (EVISH-EVISS) pour différent type de forêts.

3.4 Confirmation des types forestiers trouvés

A partir de l'image MODIS (10 bandes), on a pu établir 15 types d'occupation du sol. La figure Figure 7 illustre les principaux types forestiers trouvés de la plus haute résolution (GeoEye-1) à la plus basse résolution (MODIS) en passant par l'échelle intermédiaire des images SPOT-5.

Les forêts mixtes (FM) sont des forêts primaires ombrophiles composées, dans la partie supérieure de leur strate, d'espèces décidues en proportion variable, mélangées avec des espèces sempervirentes. Les arbres décidus perdent leurs feuilles brièvement de manière plus ou moins simultanée, conférant une couleur verte à la canopée. La période de chute de feuillage coïncide avec la saison sèche. Dans ces FM, on différencie plusieurs types et notamment :

FM4 : Sur les images GeoEye acquises pendant la saison sèche, les couronnes des arbres composant ces forêts apparaissent rouges avec des arbres defeuillés. On observe en parallèle sur les images SPOT, que les pixels ont des fortes valeurs de CN dans le canal rouge, et plutôt faibles dans le canal PIR. Sur l'image MODIS, les pixels ont une couleur brun rouge correspondant à une forte amplitude annuelle (EVI_{SH}-EVI_{SS}).

FM1 : sont des forêts primaires ombrophiles fermées, recouvertes d'arbres feuillés avec de belles couronnes. Ces forêts n'ont pas de comportement saisonnier notable. Leur feuilles sont sombres et mésophiles. Sur l'image SPOT, la valeur des CN est élevée dans la bande PIR et faible dans le canal rouge. Sur l'image MODIS, les pixels ont une couleur vert/brun, correspondant à une faible amplitude annuelle (EVI_{SH}-EVI_{SS}). Les autres bandes de l'image MODIS permettent de distinguer les MF2 qui diffèrent des MF1 dans leur proportion en arbres décidus, les MF1 étant plus sempervirentes que les MF2.

YSF : apparaissent sous forme de piste forestière ou de taches localisées à proximité des routes et des villages. Ces forêts ont repoussé après abatage ou exploitation. Elles sont composées d'espèces pionnières comme *Mussanga cecropioides* qui sont en plein développement pour reconquérir des cultures. Ces espèces sont composées de feuilles planophiles et sont continuellement renouvelées. L'activité photosynthétique y est permanente. Sur l'image SPOT, les valeurs des CN sont très élevées dans la bande PIR, bien supérieures à celles des forêts de type sempervirens FM1. Sur l'image MODIS, le pixel aura plutôt une couleur vert/jaune correspondant à une amplitude annuelle (EVI_{SH}-EVI_{SS}) modérée et à des valeurs de l'EVI élevées aux 2 saisons.

OF : sont des forêts secondaires matures ouvertes, endommagées suite aux interventions humaines et/ou animales où il existe un sous bois ouvert important composées d'espèces de marantacée de type lianescent qui ont des fortes valeurs de CN dans canal PIR mais moins élevées que les forêts secondaires. Ces forêts sont composées également de quelques grands arbres émergents présentant un caractère décidu. Sur MODIS, ces forêts ont une amplitude annuelle (EVI_{SH}-EVI_{SS}) élevée due à ces arbres émergents. Les pixels apparaissent en jaune.

GDF 2: sont de type sempervirent. Leur feuillage est foncé et erectophile. Sur l'image GeoEye, elles ont une texture bien particulière en forme de « pompon » qui permet de les distinguer des autres types forestiers. Sur SPOT, les valeurs des CN dans la bande rouge ou la bande PIR sont faibles en accord avec leur faible amplitude annuelle ($EVI_{SH}-EVI_{SS}$). Les pixels de l'image MODIS apparaissent brun/vert. Par contre, on observe qu'il existe un autre groupe GDF1 différenciable uniquement par les autres bandes de l'image MODIS finale. Les GDF1 sembleraient plus décidues que les GDF2.

Pour finir, il existe les classes Savane herbacées et des Savanes arbustives. L'analyse de l'image MODIS 10 bandes permet de détecter 2 autres types de forêts qu'on appellera FM5 et FM6 qui pourraient être des forêts de types atlantiques.

Les coefficients de Jeffries-Matusita sont proches de 1.9, reflétant une bonne séparabilité des ROIs entre elles.

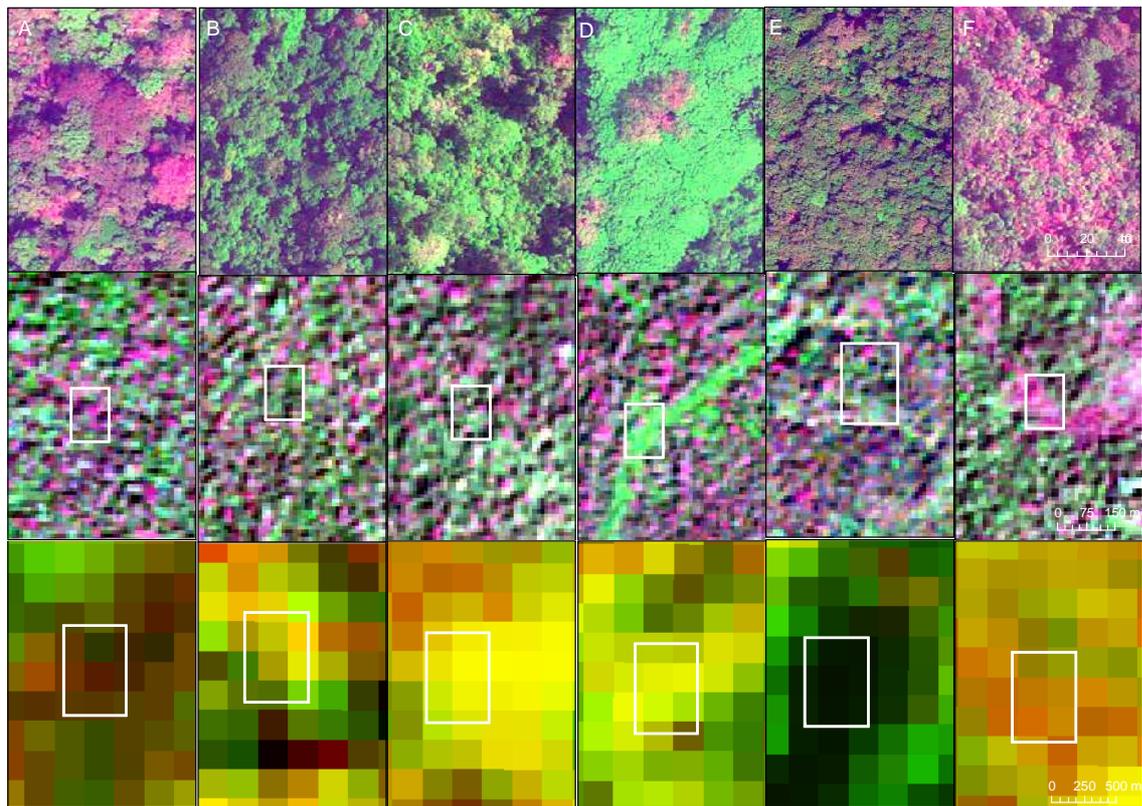


Figure 7 : principales classes de forêts de l'image GeoEye-1 à l'image MODIS. La composition colorée des images GeoEye-1 et SPOT-5 ©CNES (2006-2009), Distribution Spot Image SA, est la suivante : la bande PIR dans le canal vert, la bande rouge dans le canal rouge et la bande verte dans le canal bleu. La composition colorée de l'image MODIS : canal vert= EVI MODIS en

saison sèche et canal rouge= EVI MODIS en saison humide). A: FM4, B: FM1, C: OF, D: YSF, E: GDF1, F: Swamp forest.

3.5 Carte issue de l'image MODIS

A l'issue de ces différentes étapes, on obtient une classification des différents groupes forestiers qui apparaît cohérente (Figure 8). Elle distingue bien les différents types d'occupation du sol qui apparaissent bien uniforme sans effet « poivre et sel ». La classification donne un aspect en forme de mosaïque caractérisée par la dominance locale de grands ensembles forestiers de signatures radiométrique et phénologique stables. Nous observons que les YSF apparaissent à proximité des villes et villages et qu'elles longent les routes. A leur côté, il y a les OF apparaissant comme une zone de transition entre les forêts secondaires et les forêts primaires. Les forêts de type FM4 sont distribuées suivant un gradient de « déciduité » qui s'accroît d'Ouest en Est. Ce gradient de « déciduité » pourrait correspondre à la décroissance du gradient pluviométrique d'Ouest en Est connu. La distribution des forêts MF1 et GDF2 est plutôt centrale avec une localisation dans l'extrême sud du Cameroun et le nord du Congo. Les forêts GDF1 sont localisées plutôt dans la partie Est du TRIDOM, à l'extrême sud-est du Cameroun et nord-est du Congo. Les forêts FM5 et FM6 sont localisées à l'ouest du complexe dans la partie Gabonaise et pourraient correspondre aux forêts atlantiques. La matrice de confusion (voir annexe) a été calculée en utilisant des ROIs différentes que les ROIs utilisées pour l'apprentissage. La matrice donne un coefficient Kappa = 0.9555 avec une précision totale = 96.17 %. La Table 2 donne les statistiques de superficie d'occupation du sol issues de la classification et les erreurs de commission et omission.

| Classes | % |
|-------------------|-------|
| Bâti | 2,23 |
| MF3 | 20,24 |
| MF6 | 1,53 |
| MF4 | 18,34 |
| OF | 12,87 |
| Forêt marécageuse | 0,29 |
| YSF | 7,18 |
| GDF1 | 4,56 |
| GDF2 | 2,05 |
| Rivière | 9,24 |
| Savane arbustive | 0,65 |
| Savane herbacée | 0,93 |
| MF1 | 3,83 |
| MF 2 | 13,39 |
| MF5 | 1,40 |
| Unclassified | 1,28 |

| Classes | Commission % | Omission % | Commission (Pixels) | Omission (Pixels) |
|-------------------|--------------|------------|---------------------|-------------------|
| GDF2 | 2.13 | 2.13 | 1/7 | 1/47 |
| GDF1 | 2.99 | 1.82 | 5/167 | 3/165 |
| Bâti | 12.5 | 0 | 1/8 | 0/7 |
| FM4 | 2.52 | 0.2 | 13/515 | 1/503 |
| Forêt marécageuse | 4.62 | 31.11 | 3/65 | 28/90 |
| FM5 | 0 | 1.85 | 0/106 | 2/108 |
| FM6 | 8.05 | 0 | 7/87 | 0/80 |
| OF | 2.82 | 1.15 | 5/177 | 2/174 |
| YSF | 3.23 | 3.23 | 1/31 | 1/31 |
| Rivière | 5.26 | 0 | 11/209 | 0/198 |
| Savane arbustive | 0 | 0 | 4/406 | 0/402 |
| Savane herbacée | 0 | 0 | 0/338 | 0/338 |
| FM2 | 4.58 | 2.67 | 42/918 | 24/900 |
| FM1 | 11.73 | 0.69 | 19/162 | 1/144 |
| FM3 | 18.75 | 49.61 | 15/80 | 64/129 |

Table 2 : (A) Statistiques de superficie des différentes occupations du sol issues de la classification. (B) Tableau des omissions et commissions.

Les classes FM3 et Forêt marécageuse ont les erreurs de commission les plus fortes (49.61% et 31.11% respectivement). Les classes FM3 et FM1 ont les erreurs d'omissions les plus fortes (18.75% et 11.73 % respectivement). La classe FM3 est donc la classe où les pixels sont les plus mal classés.

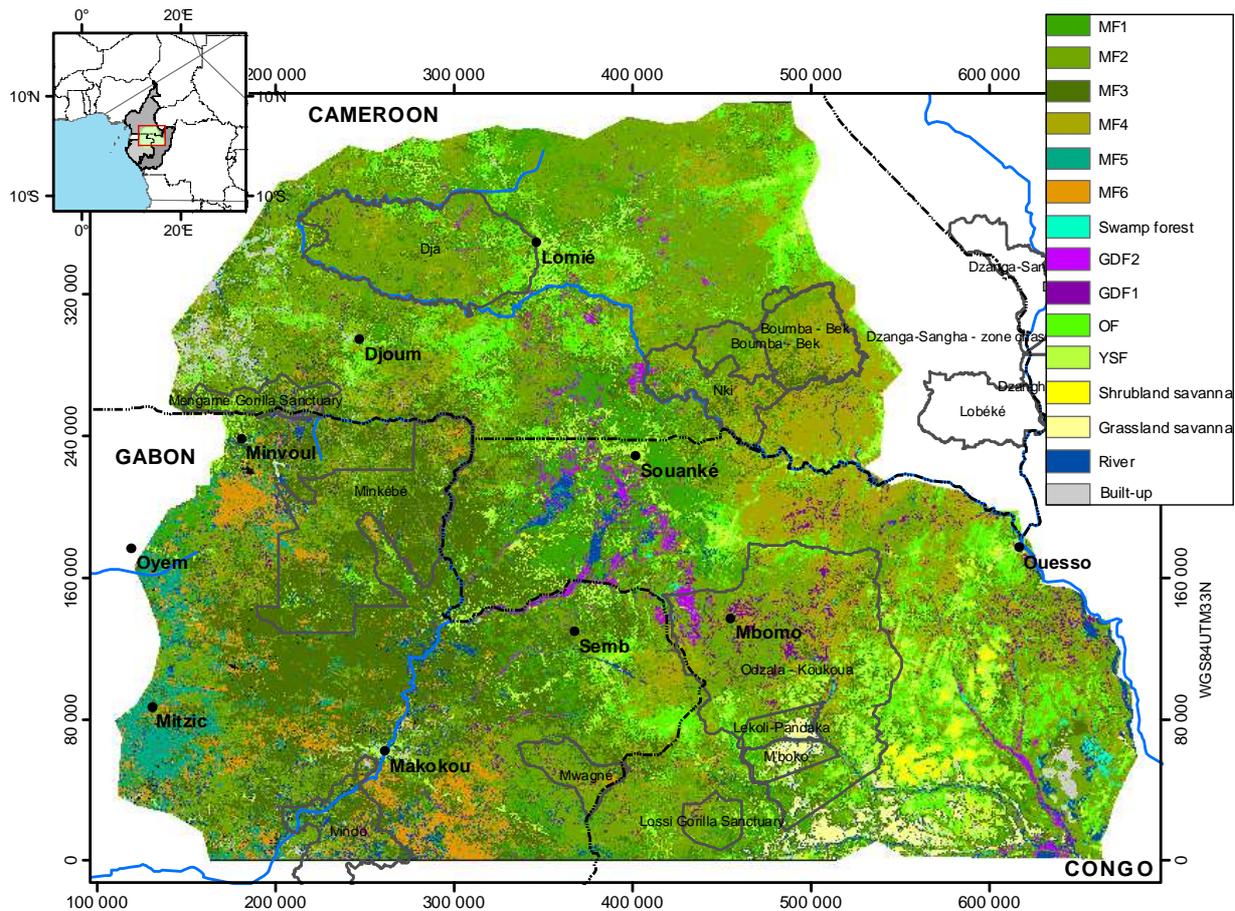


Figure 8 : carte issue de la classification supervisée de l'image MODIS finale

3.6 Validation de la proportion de décidus

La proportion de décidus estimée sur les images SPOT-5 valide les résultats trouvés. Les FM4 ont un comportement phénologique et structural typique (Figure 9). Au contraire, les FM1 et GDF2 montrent une proportion de décidue plus faible. Les FM3 et FM2 ne sont pas séparables en proportion de « déciduité » mais sur les valeurs moyennes de l'EVI pour les saisons sèches et

humides. Le test de Kruskal Wallis et les tests de comparaison post hoc confirment ces résultats ($p < 0.0001$).

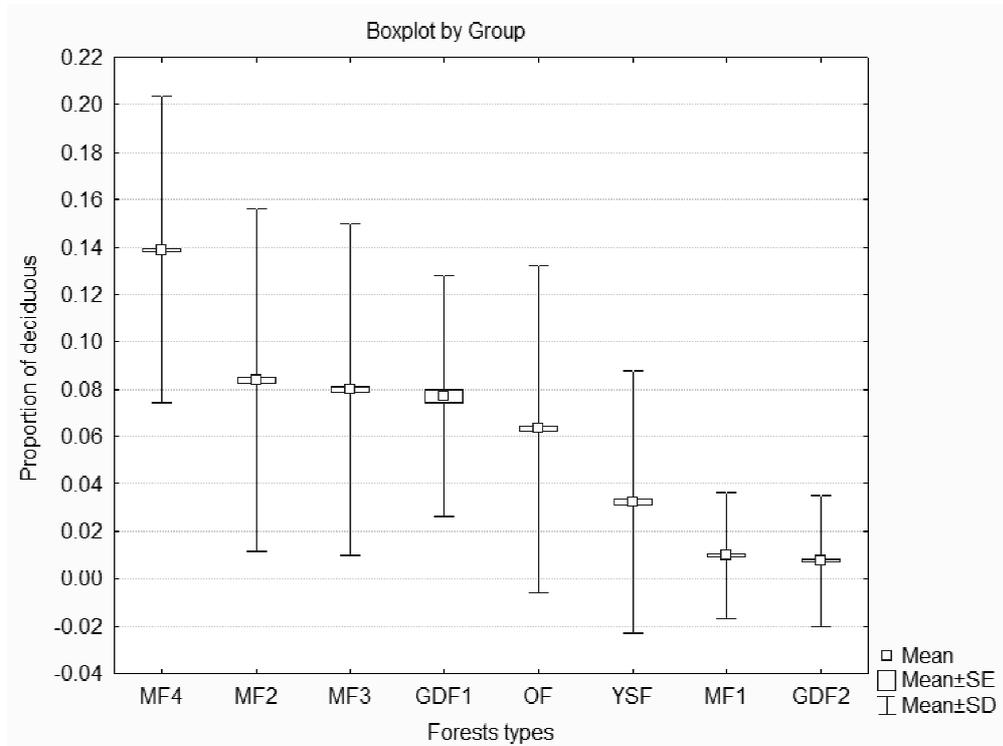


Figure 9 : proportion de décidus calculée sur les images SPOT pour les différents groupes forestiers.

4 Discussion

Dans cette étude, nous présentons une méthode basée sur une procédure itérative multi échelle pour cartographier la phénologie des forêts tropicales dans la zone TRIDOM. Pour la première fois, nous montrons que la variation annuelle de l'indice de végétation EVI issu des données hyper-temporelle MODIS permet de distinguer et identifier les forêts mixtes selon un comportement phénologique. Les forêts FM4 montrent une forte amplitude annuelle ($EVI_{SH} - EVI_{SS}$), suggérant un comportement plutôt de type décidu, contrairement à FM1 et GDF 2 qui ont de faibles amplitudes suggérant plutôt un comportement sempervirent. Entre ces deux extrêmes, d'autres types de forêts se positionnent sur ce gradient de « déciduité » (FM2, 3,5 et 6). Pour tous les types de forêts trouvés, nous observons une chute des valeurs moyennes de l'indice de végétation EVI pendant la saison sèche, en accord avec Neami [23] et Botta [24] qui décrivent un modèle d'écosystème où la photosynthèse chute pendant la saison sèche à cause du stress hydrique. Malhi [25] et Von Randow [26] montrent qu'il existe bien une saisonnalité de la

photosynthèse dans le bassin amazonien, avec un pic de la photosynthèse fortement corrélé avec le contenu en humidité du sol. Brando [27] montre que l'EVI diminue en même temps que la disponibilité en eau pour les plantes (PAW) et la sécheresse de l'air (Vapor Pressure Deficit) dans les régions à canopée moyennement dense. Il observe à travers des données terrains en Amazonie, que la variation mensuel EVI ne serait pas corrélée à l'indice de surface foliaire (LAI) mais au rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) à l'origine de la production de nouvelles feuilles. Toutefois, Huete [14] montre que l'EVI augmenterait de 25% pendant la saison sèche dans les forêts amazoniennes. De même, Saleska (2003) montre une augmentation de la biomasse pendant la saison sèche au Brésil. Ces différents résultats montrent que les mécanismes contrôlant la phénologie et la photosynthèse des forêts tropicales ne sont pas bien compris. Selon la sévérité de la saison sèche, les modèles de phénologie foliaire diffèrent largement entre les forêts tropicales.

Nous montrons aussi dans cette étude que la proportion de décidus estimée sur les images SPOT-5 permet de valider les différents comportements phénologiques trouvés avec l'analyse d'EVI. Bolhman [12] montre que la télédétection est en mesure de quantifier avec précision les arbres décidus de la canopée. Nous concluons donc que la variation de l'indice de végétation au cours du temps peut détecter les tendances de la saisonnalité de l'activité photosynthétique et de différencier les forêts mélangées selon un comportement phénologique. Enfin, nous pouvons dire que l'indice de végétation EVI présente un double intérêt pour discriminer des types forestiers. Sa valeur moyenne annuelle est en effet liée à la structure de la canopée et à l'orientation des feuilles, alors que sa variation saisonnière répond au cycle phénologique foliaire.

La carte issue de la classification de l'image MODIS donne une mosaïque régionale de la phénologie de la végétation. Nous trouvons un gradient de densité d'arbres décidus dans la canopée supérieure des forêts mixtes, se propageant du Nord-Ouest au Sud-Est de la zone d'étude, en accord avec Letouzey [28] décrivant un gradient de « déciduité » qui suit un gradient pluviométrique. Selon Gilbert et Lebrun [29], la zone d'étude est située dans une zone de transition entre pur sempervirent et pur décidu. White [5] localise la forêt tropicale sempervirente dans la région avec les plus fortes précipitations (2-300 mm / an), le long de la frontière du Cameroun et du Gabon. Au Nord-Est du Gabon, on trouve les FM5 qui pourraient être des forêts atlantiques à *Aucoumeae klaineana* comme le décrivent Gloriod [30] et Brunck [31]. En effet, ces forêts se trouvent sur une bande d'environ 200 km de largeur qui prendrait en écharpe le Gabon de Oyem/Mitzic à Lastourville. Gloriod [30] décrit un autre type de forêt au Gabon, sans *Aucoumeae klaineana*. Cette forêt serait composée de quelques *Sterculiaceae* *Ulmaceae* caractéristiques des forêts semi-décidues d'Afrique. Cela pourrait être les FM 3. Au sud-ouest de la carte, nous trouvons un autre type de forêt mixte FM6 qui pourraient être la forêt Atlantique riche en *Caesalpiniaceae* que décrit Letouzey [9], appelée forêt Biafreene. Nous localisons les mêmes patchs de forêts à *Gilbertiodendron dewevrei* dans le Sud Est du Cameroun que Letouzey [9]. Les forêts GDF2 semblent être plus sempervirentes que les forêts GDF1. Nous trouvons 2 types de forêts secondaires, des forêts plutôt jeunes que nous avons identifiées en YSF riches en

Mussanga cecropioides et des forêts plutôt vieille baptisées OF composées d'un sous bois riche en marantacée avec quelques émergents à caractère décidu, ce qui expliquerait la forte amplitude de l'EVI trouvée sur l'image MODIS paradoxalement à la forte réflectance dans le canal PIR des images SPOT et GeoEye. Nous trouvons également des forêts inondées ou Swamp forests que White [5] a localisées en grande partie dans la cuvette congolaise. Ce sont des forêts ombrophiles mais moins denses que la forêt de terre ferme. Dans les éclaircies de ces forêts, on rencontre de nombreux palmiers. Enfin, bien qu'essentiellement occupées par des forêts denses, on retrouve quelques savanes au niveau du Congo (Schnell, [16]).

Finalement, l'aspect en mosaïque des forêts obtenu sur la carte, est en adéquation avec l'aspect des forêts de l'Afrique Centrale, caractérisée par un mélange ou une juxtaposition de groupements d'espèces de type sempervirent et de type semi-sempervirent. Ce phénomène est probablement une conséquence à long terme des perturbations engendrées par un changement climatique de grande ampleur [32]. Toutefois, cette méthode itérative multi échelle a ses limites. Malgré le prétraitement des images SPOT, il reste encore des perturbations atmosphériques dues à la forte nébulosité qui règne sur la région. Nous n'arrivons pas à cartographier les fines structures comme les raphiales observées sur les images Geoeye. Une analyse texturale avec la méthode FOTO [33] pourrait résoudre ces problèmes.

Pour conclure, nous montrons dans cette étude, qu'il est possible de cartographier, à l'échelle régionale, la répartition des types de forêts selon un axe phénologique et d'estimer la proportion de décidus. Pouvoir cartographier les forêts à grande échelle et à moindre coût est très prometteur pour la gestion des loggings, la conservation de la biodiversité, et pour empêcher la déforestation et la dégradation des forêts dans les pays en voie de développement.

Remerciements

Je tiens principalement à remercier Nicolas Barbier, Chargé de Recherche IRD, pour son encadrement et ses précieux commentaires qui m'ont permis de surmonter les difficultés et de progresser durant toute la durée de ce projet.

Je remercie également le Directeur de l'Unité, Pierre Couteron, qui a m'a permis de suivre la formation du CEA d'AgroPariTech en Géomatique.

Je remercie Roberto Meloni, tuteur du CEA, et Marie Christine Bois, responsable pédagogique AgroParisTech-Engref, pour l'aide et le temps qu'ils ont bien voulu me consacrer.

Enfin, je remercie le programme ISIS du CNES pour l'obtention des images SPOT 5 .

Bibliographie

- [1] J. Grace, « Understanding and managing the global carbon cycle », *Journal of Ecology*, vol. 92, n^o. 2, p. 189–202, 2004.
- [2] S. L. Lewis, J. Lloyd, S. Sitch, E. T. A. Mitchard, et W. F. Laurance, « Changing ecology of tropical forests: evidence and drivers », *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, vol. 40, p. 529–549, 2009.
- [3] C. de Wasseige, D. Decers, P. de Marcken, R. Eba'a Aty, R. Nasi, et P. Mayaux, *The forests of the Congo Basin : State of the Forest 2008*. .
- [4] *The Forests of the Congo Basin: State of the Forest 2006 — CARPE*. .
- [5] F. White, « La végétation de l'Afrique », *Recherches sur les Ressources Naturelles*, 1986.
- [6] J. Q. Chambers, J. I. Fisher, H. Zeng, E. L. Chapman, D. B. Baker, et G. C. Hurtt, « Hurricane Katrina's carbon footprint on US Gulf Coast forests », *Science*, vol. 318, n^o. 5853, p. 1107, 2007.
- [7] P. B. Reich et R. Borchert, « Phenology and ecophysiology of the tropical tree, *Tabebuia neochrysantha* (Bignoniaceae) », *Ecology*, p. 294–299, 1982.
- [8] S. J. Wright et C. P. Van Schaik, « Light and the phenology of tropical trees », *American Naturalist*, p. 192–199, 1994.
- [9] R. Letouzey, « Notice de la carte phytogéographique du Cameroun au 1: 500 000 (1985): 2 », *M-SM: region afro-montagnarde et etage submontagnard*, p. 27, 1985.
- [10] O. Arino et al., « GLOBCOVER-A Global Land Cover Service with MERIS », in *Proceedings of the ENVISAT Symposium*, 2007, p. 23–27.
- [11] M. C. Hansen, D. P. Roy, E. Lindquist, B. Adusei, C. O. Justice, et A. Altstatt, « A method for integrating MODIS and Landsat data for systematic monitoring of forest cover and change in the Congo Basin », *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, n^o. 5, p. 2495–2513, 2008.
- [12] S. A. Bohlman, « Landscape patterns and environmental controls of deciduousness in forests of central Panama », *Global Ecology and Biogeography*, vol. 19, n^o. 3, p. 376–385, 2010.
- [13] A. V. BRADLEY et al., « Relationships between phenology, radiation and precipitation in the Amazon region », *Global Change Biology*, 2011.
- [14] A. R. Huete et al., « Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season », *Geophysical Research Letters*, vol. 33, n^o. 4, 2006.
- [15] F. White, « The vegetation of Africa: a descriptive memoir to accompany the UNESCO/AETFAT/UNSO vegetation map of Africa », *Natural resources research*, vol. 20, 1983.
- [16] R. Schnell, « Introduction a la Phytogéographie des Pays Tropicaux V.3. », 1970.
- [17] X. Gao, A. R. Huete, W. Ni, et T. Miura, « Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination », *Remote Sensing of Environment*, vol. 74, n^o. 3, p. 609–620, 2000.
- [18] A. Huete, K. Didan, T. Miura, E. P. Rodriguez, X. Gao, et L. G. Ferreira, « Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices », *Remote sensing of environment*, vol. 83, n^o. 1-2, p. 195–213, 2002.
- [19] J. Vrabel, « Multispectral imagery band sharpening study », *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 62, n^o. 9, p. 1075–1084, 1996.
- [20] C. J. Tucker, D. M. Grant, et J. D. Dykstra, « NASA's global orthorectified Landsat

- data set », *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 70, n° 3, p. 313–322, 2004.
- [21] T. G. Farr et al., « The shuttle radar topography mission », *REVIEWS OF GEOPHYSICS-RICHMOND VIRGINIA THEN WASHINGTON-*, vol. 45, n° 2, 2007.
- [22] J. R. Jensen, *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*, 2^e éd. Prentice Hall, 2006.
- [23] R. R. Nemani et al., « Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 », *Science*, vol. 300, n° 5625, p. 1560, 2003.
- [24] A. Botta, N. Ramankutty, et J. Foley, « Long-term variations of climate and carbon fluxes over the Amazon basin », *Geophysical Research Letters*, vol. 29, n° 9, p. 33–1, 2002.
- [25] Y. Malhi et al., « Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest », *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, n° 31, p. 593–31, 1998.
- [26] C. Von Randow et al., « Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia », *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 78, n° 1, p. 5–26, 2004.
- [27] P. M. Brando, S. J. Goetz, A. Baccini, D. C. Nepstad, P. S. A. Beck, et M. C. Christman, « Seasonal and interannual variability of climate and vegetation indices across the Amazon », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, n° 33, p. 14685, 2010.
- [28] R. Letouzey, *Etude phytogéographique du Cameroun*. Lechevalier Paris France, 1968.
- [29] J. Lebrun et G. Gilbert, *Une classification écologique des forêts du congo*, 63^e éd. 1954.
- [30] G. Gloriod, « LA FORÊT DE LEST DU GABON », *Revue Bois et Forêts des Tropiques*, p. 35, 1974.
- [31] F. Brunck, F. Grison, et H. F. Maitre, *L'okoumé (Aucoumea klaineana Pierre): monographie*. Centre technique forestier tropical, Dép. du CIRAD, 1990.
- [32] B. van Geel et al., « The sharp rise of $\delta^{14}C$ ca. 800 cal BC: Possible causes, related climatic teleconnections and the impact on human environments », *Radiocarbon*, vol. 40, n° 1, p. 535–550, 1998.
- [33] C. Proisy, P. Couteron, et F. Fromard, « Predicting and mapping mangrove biomass from canopy grain analysis using Fourier-based textural ordination of IKONOS images », *Remote Sensing of Environment*, vol. 109, n° 3, p. 379–392, 2007.

Annexes

1- Séparabilité des ROIs

2- Input File: ModisrecUTM-.tif
3- ROI Name: (Jeffries-Matusita, Transformed Divergence)
4-

Bati [White] 46 points:

5- FM3 [White] 169 points: (1.99850130 2.00000000)
6- FM6 [White] 360 points: (1.99998281 2.00000000)
7- FM4 [White] 451 points: (1.99810997 2.00000000)
8- OF [White] 329 points: (1.94212986 2.00000000)
9- Foret marecageuse [White] 60 points: (1.99999320 2.00000000)
10- YSF [White] 309 points: (1.99936920 2.00000000)
11- GDF1 [White] 250 points: (1.99995525 2.00000000)
12- GDF2 [White] 467 points: (1.99997902 2.00000000)
13- Rivière [White] 162 points: (1.99877215 2.00000000)
14- Savane arbustive [White] 3826 points: (1.99994065 2.00000000)
15- Savane herbacée [White] 788 points: (1.99929445 2.00000000)
16- FM1 [White] 727 points: (1.99999454 2.00000000)
17- FM5 [White] 717 points: (1.99998230 2.00000000)
18- FM2 [White] 598 points: (1.99956302 2.00000000)
19-

FM3 [White] 169 points:

20- Bati [White] 46 points: (1.99850130 2.00000000)
21- FM6 [White] 360 points: (1.95215697 1.99099805)
22- FM4 [White] 451 points: (1.96495653 1.99700821)
23- OF [White] 329 points: (1.94785154 1.98923608)
24- Foret marecageuse [White] 60 points: (1.99973969 2.00000000)
25- YSF [White] 309 points: (1.88984299 1.98166151)
26- GDF1 [White] 250 points: (1.99185071 1.99999706)
27- GDF2 [White] 467 points: (1.97673090 1.99785495)
28- Rivière [White] 162 points: (1.88063199 2.00000000)
29- Savane arbustive [White] 3826 points: (1.99978169 1.99998809)
30- Savane herbacée [White] 788 points: (1.99985988 2.00000000)
31- FM1 [White] 727 points: (1.96695304 1.99901842)
32- FM5 [White] 717 points: (1.99576668 1.99922127)
33- FM2 [White] 598 points: (1.90560257 1.97665286)
34-

FM6 [White] 360 points:

35- Bati [White] 46 points: (1.99998281 2.00000000)
36- FM3 [White] 169 points: (1.95215697 1.99099805)
37- FM4 [White] 451 points: (1.99100103 1.99958299)
38- OF [White] 329 points: (1.99958557 1.99999948)
39- Foret marecageuse [White] 60 points: (1.99999734 2.00000000)
40- YSF [White] 309 points: (1.99798163 1.99998857)
41- GDF1 [White] 250 points: (1.99948967 1.99999997)
42- GDF2 [White] 467 points: (1.99852734 1.99998817)
43- Rivière [White] 162 points: (1.98082983 2.00000000)

44- Savane arbustive [White] 3826 points: (1.99999897 2.00000000)
45- Savane herbacée [White] 788 points: (1.99999992 2.00000000)
46- FM1 [White] 727 points: (1.98933217 1.99959576)
47- FM5 [White] 717 points: (1.91712007 1.98815627)
48- FM2 [White] 598 points: (1.99799757 1.99990702)
49-

FM4 [White] 451 points:

50- Bati [White] 46 points: (1.99810997 2.00000000)
51- FM3 [White] 169 points: (1.96495653 1.99700821)
52- FM6 [White] 360 points: (1.99100103 1.99958299)
53- OF [White] 329 points: (1.93504001 1.98560316)
54- Foret marecageuse [White] 60 points: (1.98555824 1.99998591)
55- YSF [White] 309 points: (1.99254050 1.99905404)
56- GDF1 [White] 250 points: (1.90806301 1.99373880)
57- GDF2 [White] 467 points: (1.99382628 1.99908751)
58- Rivière [White] 162 points: (1.97299361 2.00000000)
59- Savane arbustive [White] 3826 points: (1.99999520 1.99999968)
60- Savane herbacée [White] 788 points: (1.99984619 2.00000000)
61- FM1 [White] 727 points: (1.99919231 1.99989253)
62- FM5 [White] 717 points: (1.99990020 1.99999917)
63- FM2 [White] 598 points: (1.94074000 1.98514917)
64-

OF [White] 329 points:

65- Bati [White] 46 points: (1.94212986 2.00000000)
66- FM3 [White] 169 points: (1.94785154 1.98923608)
67- FM6 [White] 360 points: (1.99958557 1.99999948)
68- FM4 [White] 451 points: (1.93504001 1.98560316)
69- Foret marecageuse [White] 60 points: (1.99995465 2.00000000)
70- YSF [White] 309 points: (1.69954562 1.82945373)
71- GDF1 [White] 250 points: (1.99903824 1.99999999)
72- GDF2 [White] 467 points: (1.99885324 1.99993850)
73- Rivière [White] 162 points: (1.98096320 2.00000000)
74- Savane arbustive [White] 3826 points: (1.98106210 1.99916375)
75- Savane herbacée [White] 788 points: (1.99994065 2.00000000)
76- FM1 [White] 727 points: (1.99919757 1.99999806)
77- FM5 [White] 717 points: (1.99999943 2.00000000)
78- FM2 [White] 598 points: (1.99690033 1.99935547)
79-

Foret marecageuse [White] 60 points:

80- Bati [White] 46 points: (1.99999320 2.00000000)
81- FM3 [White] 169 points: (1.99973969 2.00000000)
82- FM6 [White] 360 points: (1.99999734 2.00000000)
83- FM4 [White] 451 points: (1.98555824 1.99998591)
84- OF [White] 329 points: (1.99995465 2.00000000)
85- YSF [White] 309 points: (1.99931494 2.00000000)
86- GDF1 [White] 250 points: (1.99880697 1.99999081)
87- GDF2 [White] 467 points: (1.99018960 1.99983709)
88- Rivière [White] 162 points: (1.98335930 2.00000000)
89- Savane arbustive [White] 3826 points: (2.00000000 2.00000000)
90- Savane herbacée [White] 788 points: (1.99999846 2.00000000)
91- FM1 [White] 727 points: (1.99980493 2.00000000)
92- FM5 [White] 717 points: (1.99994514 2.00000000)

93- FM2 [White] 598 points: (1.96714668 1.99995504)
94-

YSF [White] 309 points:

95- Bati [White] 46 points: (1.99936920 2.00000000)
96- FM3 [White] 169 points: (1.88984299 1.98166151)
97- FM6 [White] 360 points: (1.99798163 1.99998857)
98- FM4 [White] 451 points: (1.99254050 1.99905404)
99- OF [White] 329 points: (1.69954562 1.82945373)
100- Foret marecageuse [White] 60 points: (1.99931494 2.00000000)
101- GDF1 [White] 250 points: (1.99899101 1.99999998)
102- GDF2 [White] 467 points: (1.97126576 1.99798550)
103- Rivière [White] 162 points: (1.98241337 2.00000000)
104- Savane arbustive [White] 3826 points: (1.86938858 1.94319748)
105- Savane herbacée [White] 788 points: (1.99998727 2.00000000)
106- FM1 [White] 727 points: (1.93963517 1.99970121)
107- FM5 [White] 717 points: (1.99989342 1.99999982)
108- FM2 [White] 598 points: (1.96875469 1.99949945)
109-

GDF1 [White] 250 points:

110- Bati [White] 46 points: (1.99995525 2.00000000)
111- FM3 [White] 169 points: (1.99185071 1.99999706)
112- FM6 [White] 360 points: (1.99948967 1.99999997)
113- FM4 [White] 451 points: (1.90806301 1.99373880)
114- OF [White] 329 points: (1.99903824 1.99999999)
115- Foret marecageuse [White] 60 points: (1.99880697 1.99999081)
116- YSF [White] 309 points: (1.99899101 1.99999998)
117- GDF2 [White] 467 points: (1.99173170 1.99903672)
118- Rivière [White] 162 points: (1.97841059 2.00000000)
119- Savane arbustive [White] 3826 points: (1.99999903 2.00000000)
120- Savane herbacée [White] 788 points: (1.99999937 2.00000000)
121- FM1 [White] 727 points: (1.99990840 1.99999571)
122- FM5 [White] 717 points: (1.99995693 1.99999958)
123- FM2 [White] 598 points: (1.95753276 1.99704353)
124-

GDF2 [White] 467 points:

125- Bati [White] 46 points: (1.99997902 2.00000000)
126- FM3 [White] 169 points: (1.97673090 1.99785495)
127- FM6 [White] 360 points: (1.99852734 1.99998817)
128- FM4 [White] 451 points: (1.99382628 1.99908751)
129- OF [White] 329 points: (1.99885324 1.99993850)
130- Foret marecageuse [White] 60 points: (1.99018960 1.99983709)
131- YSF [White] 309 points: (1.97126576 1.99798550)
132- GDF1 [White] 250 points: (1.99173170 1.99903672)
133- Rivière [White] 162 points: (1.94913794 2.00000000)
134- Savane arbustive [White] 3826 points: (1.99999605 2.00000000)
135- Savane herbacée [White] 788 points: (1.99995634 2.00000000)
136- FM1 [White] 727 points: (1.83030349 1.94721767)
137- FM5 [White] 717 points: (1.99831810 1.99997704)
FM2 [White] 598 points: (1.67232385 1.87262514)

138-

Rivière [White] 162 points:

139- Bati [White] 46 points: (1.99877215 2.00000000)

140- FM3 [White] 169 points: (1.88063199 2.00000000)
 141- FM6 [White] 360 points: (1.98082983 2.00000000)
 142- FM4 [White] 451 points: (1.97299361 2.00000000)
 143- OF [White] 329 points: (1.98096320 2.00000000)
 144- Foret marecageuse [White] 60 points: (1.98335930 2.00000000)
 145- YSF [White] 309 points: (1.98241337 2.00000000)
 146- GDF1 [White] 250 points: (1.97841059 2.00000000)
 147- GDF2 [White] 467 points: (1.94913794 2.00000000)
 148- Savane arbustive [White] 3826 points: (1.99988129 2.00000000)
 149- Savane herbacée [White] 788 points: (1.99894411 2.00000000)
 150- FM1 [White] 727 points: (1.97171426 2.00000000)
 151- FM5 [White] 717 points: (1.96853136 2.00000000)
 152- FM2 [White] 598 points: (1.84746020 2.00000000)
 153-

Savane arbustive [White] 3826 points:

154- Bati [White] 46 points: (1.99994065 2.00000000)
 155- FM3 [White] 169 points: (1.99978169 1.99998809)
 156- FM6 [White] 360 points: (1.99999897 2.00000000)
 157- FM4 [White] 451 points: (1.99999520 1.99999968)
 158- OF [White] 329 points: (1.98106210 1.99916375)
 159- Foret marecageuse [White] 60 points: (2.00000000 2.00000000)
 160- YSF [White] 309 points: (1.86938858 1.94319748)
 161- GDF1 [White] 250 points: (1.99999903 2.00000000)
 162- GDF2 [White] 467 points: (1.99999605 2.00000000)
 163- Rivière [White] 162 points: (1.99988129 2.00000000)
 164- Savane herbacée [White] 788 points: (1.99999999 2.00000000)
 165- FM1 [White] 727 points: (1.99998915 2.00000000)
 166- FM5 [White] 717 points: (1.99999995 2.00000000)
 167- FM2 [White] 598 points: (1.99999983 2.00000000)
 168-

Savane herbacée [White] 788 points:

169- Bati [White] 46 points: (1.99929445 2.00000000)
 170- FM3 [White] 169 points: (1.99985988 2.00000000)
 171- FM6 [White] 360 points: (1.99999992 2.00000000)
 172- FM4 [White] 451 points: (1.99984619 2.00000000)
 173- OF [White] 329 points: (1.99994065 2.00000000)
 174- Foret marecageuse [White] 60 points: (1.99999846 2.00000000)
 175- YSF [White] 309 points: (1.99998727 2.00000000)
 176- GDF1 [White] 250 points: (1.99999937 2.00000000)
 177- GDF2 [White] 467 points: (1.99995634 2.00000000)
 178- Rivière [White] 162 points: (1.99894411 2.00000000)
 179- Savane arbustive [White] 3826 points: (1.99999999 2.00000000)
 180- FM1 [White] 727 points: (1.99999863 2.00000000)
 181- FM5 [White] 717 points: (2.00000000 2.00000000)
 182- FM2 [White] 598 points: (1.99926484 2.00000000)
 183-

FM1 [White] 727 points:

184- Bati [White] 46 points: (1.99999454 2.00000000)
 185- FM3 [White] 169 points: (1.96695304 1.99901842)
 186- FM6 [White] 360 points: (1.98933217 1.99959576)
 187- FM4 [White] 451 points: (1.99919231 1.99989253)
 188- OF [White] 329 points: (1.99919757 1.99999806)

189- Foret marecageuse [White] 60 points: (1.99980493 2.00000000)
 190- YSF [White] 309 points: (1.93963517 1.99970121)
 191- GDF1 [White] 250 points: (1.99990840 1.99999571)
 192- GDF2 [White] 467 points: (1.83030349 1.94721767)
 193- Rivière [White] 162 points: (1.97171426 2.00000000)
 194- Savane arbustive [White] 3826 points: (1.99998915 2.00000000)
 195- Savane herbacée [White] 788 points: (1.99999863 2.00000000)
 196- FM5 [White] 717 points: (1.99855223 1.99958914)
 197- FM2 [White] 598 points: (1.90482440 1.94226593)
 198-

FM5 [White] 717 points:

199- Bati [White] 46 points: (1.99998230 2.00000000)
 200- FM3 [White] 169 points: (1.99576668 1.99922127)
 201- FM6 [White] 360 points: (1.91712007 1.98815627)
 202- FM4 [White] 451 points: (1.99990020 1.99999917)
 203- OF [White] 329 points: (1.99999943 2.00000000)
 204- Foret marecageuse [White] 60 points: (1.99994514 2.00000000)
 205- YSF [White] 309 points: (1.99989342 1.99999982)
 206- GDF1 [White] 250 points: (1.99995693 1.99999958)
 207- GDF2 [White] 467 points: (1.99831810 1.99997704)
 208- Rivière [White] 162 points: (1.96853136 2.00000000)
 209- Savane arbustive [White] 3826 points: (1.99999995 2.00000000)
 210- Savane herbacée [White] 788 points: (2.00000000 2.00000000)
 211- FM1 [White] 727 points: (1.99855223 1.99958914)
 212- FM2 [White] 598 points: (1.99870979 1.99990232)
 213-

FM2 [White] 598 points:

214- Bati [White] 46 points: (1.99956302 2.00000000)
 215- FM3 [White] 169 points: (1.90560257 1.97665286)
 216- FM6 [White] 360 points: (1.99799757 1.99990702)
 217- FM4 [White] 451 points: (1.94074000 1.98514917)
 218- OF [White] 329 points: (1.99690033 1.99935547)
 219- Foret marecageuse [White] 60 points: (1.96714668 1.99995504)
 220- YSF [White] 309 points: (1.96875469 1.99949945)
 221- GDF1 [White] 250 points: (1.95753276 1.99704353)
 222- GDF2 [White] 467 points: (1.67232385 1.87262514)
 223- Rivière [White] 162 points: (1.84746020 2.00000000)
 224- Savane arbustive [White] 3826 points: (1.99999983 2.00000000)
 225- Savane herbacée [White] 788 points: (1.99926484 2.00000000)
 226- FM1 [White] 727 points: (1.90482440 1.94226593)
 227- FM5 [White] 717 points: (1.99870979 1.99990232)
 228-

Pair Separation (least to most);

229-
 GDF2 [White] 467 points and FM2 [White] 598 points - 1.67232385
 OF [White] 329 points and YSF [White] 309 points - 1.69954562
 GDF2 [White] 467 points and FM1 [White] 727 points - 1.83030349
 Rivière [White] 162 points and FM2 [White] 598 points - 1.84746020
 YSF [White] 309 points and Savane arbustive [White] 3826 points -
 1.86938858
 FM3 [White] 169 points and Rivière [White] 162 points - 1.88063199
 FM3 [White] 169 points and YSF [White] 309 points - 1.88984299

FM1 [White] 727 points and FM2 [White] 598 points - 1.90482440
 FM3 [White] 169 points and FM2 [White] 598 points - 1.90560257
 FM4 [White] 451 points and GDF1 [White] 250 points - 1.90806301
 FM6 [White] 360 points and FM5 [White] 717 points - 1.91712007
 FM4 [White] 451 points and OF [White] 329 points - 1.93504001
 YSF [White] 309 points and FM1 [White] 727 points - 1.93963517
 FM4 [White] 451 points and FM2 [White] 598 points - 1.94074000
 Bati [White] 46 points and OF [White] 329 points - 1.94212986
 FM3 [White] 169 points and OF [White] 329 points - 1.94785154
 GDF2 [White] 467 points and Rivière [White] 162 points - 1.94913794
 FM3 [White] 169 points and FM6 [White] 360 points - 1.95215697
 GDF1 [White] 250 points and FM2 [White] 598 points - 1.95753276
 FM3 [White] 169 points and FM4 [White] 451 points - 1.96495653
 FM3 [White] 169 points and FM1 [White] 727 points - 1.96695304
 Foret marecageuse [White] 60 points and FM2 [White] 598 points -
 1.96714668
 Rivière [White] 162 points and FM5 [White] 717 points - 1.96853136
 YSF [White] 309 points and FM2 [White] 598 points - 1.96875469
 YSF [White] 309 points and GDF2 [White] 467 points - 1.97126576
 Rivière [White] 162 points and FM1 [White] 727 points - 1.97171426
 FM4 [White] 451 points and Rivière [White] 162 points - 1.97299361
 FM3 [White] 169 points and GDF2 [White] 467 points - 1.97673090
 GDF1 [White] 250 points and Rivière [White] 162 points - 1.97841059
 FM6 [White] 360 points and Rivière [White] 162 points - 1.98082983
 OF [White] 329 points and Rivière [White] 162 points - 1.98096320
 OF [White] 329 points and Savane arbustive [White] 3826 points -
 1.98106210
 YSF [White] 309 points and Rivière [White] 162 points - 1.98241337
 Foret marecageuse [White] 60 points and Rivière [White] 162 points -
 1.98335930
 FM4 [White] 451 points and Foret marecageuse [White] 60 points -
 1.98555824
 FM6 [White] 360 points and FM1 [White] 727 points - 1.98933217
 Foret marecageuse [White] 60 points and GDF2 [White] 467 points -
 1.99018960
 FM6 [White] 360 points and FM4 [White] 451 points - 1.99100103
 GDF1 [White] 250 points and GDF2 [White] 467 points - 1.99173170
 FM3 [White] 169 points and GDF1 [White] 250 points - 1.99185071
 FM4 [White] 451 points and YSF [White] 309 points - 1.99254050
 FM4 [White] 451 points and GDF2 [White] 467 points - 1.99382628
 FM3 [White] 169 points and FM5 [White] 717 points - 1.99576668
 OF [White] 329 points and FM2 [White] 598 points - 1.99690033
 FM6 [White] 360 points and YSF [White] 309 points - 1.99798163
 FM6 [White] 360 points and FM2 [White] 598 points - 1.99799757
 Bati [White] 46 points and FM4 [White] 451 points - 1.99810997
 GDF2 [White] 467 points and FM5 [White] 717 points - 1.99831810
 Bati [White] 46 points and FM3 [White] 169 points - 1.99850130
 FM6 [White] 360 points and GDF2 [White] 467 points - 1.99852734
 FM1 [White] 727 points and FM5 [White] 717 points - 1.99855223
 FM5 [White] 717 points and FM2 [White] 598 points - 1.99870979
 Bati [White] 46 points and Rivière [White] 162 points - 1.99877215

Foret marecageuse [White] 60 points and GDF1 [White] 250 points -
 1.99880697
 OF [White] 329 points and GDF2 [White] 467 points - 1.99885324
 Rivière [White] 162 points and Savane herbacée [White] 788 points -
 1.99894411
 YSF [White] 309 points and GDF1 [White] 250 points - 1.99899101
 OF [White] 329 points and GDF1 [White] 250 points - 1.99903824
 FM4 [White] 451 points and FM1 [White] 727 points - 1.99919231
 OF [White] 329 points and FM1 [White] 727 points - 1.99919757
 Savane herbacée [White] 788 points and FM2 [White] 598 points -
 1.99926484
 Bati [White] 46 points and Savane herbacée [White] 788 points -
 1.99929445
 Foret marecageuse [White] 60 points and YSF [White] 309 points -
 1.99931494
 Bati [White] 46 points and YSF [White] 309 points - 1.99936920
 230- FM6 [White] 360 points and GDF1 [White] 250 points -
 1.99948967
 Bati [White] 46 points and FM2 [White] 598 points - 1.99956302
 FM6 [White] 360 points and OF [White] 329 points - 1.99958557
 FM3 [White] 169 points and Foret marecageuse [White] 60 points -
 1.99973969
 FM3 [White] 169 points and Savane arbustive [White] 3826 points -
 1.99978169
 Foret marecageuse [White] 60 points and FM1 [White] 727 points -
 1.99980493
 FM4 [White] 451 points and Savane herbacée [White] 788 points -
 1.99984619
 FM3 [White] 169 points and Savane herbacée [White] 788 points -
 1.99985988
 Rivière [White] 162 points and Savane arbustive [White] 3826 points -
 1.99988129
 YSF [White] 309 points and FM5 [White] 717 points - 1.99989342
 FM4 [White] 451 points and FM5 [White] 717 points - 1.99990020
 GDF1 [White] 250 points and FM1 [White] 727 points - 1.99990840
 OF [White] 329 points and Savane herbacée [White] 788 points -
 1.99994065
 Bati [White] 46 points and Savane arbustive [White] 3826 points -
 1.99994065
 Foret marecageuse [White] 60 points and FM5 [White] 717 points -
 1.99994514
 OF [White] 329 points and Foret marecageuse [White] 60 points -
 1.99995465
 Bati [White] 46 points and GDF1 [White] 250 points - 1.99995525
 GDF2 [White] 467 points and Savane herbacée [White] 788 points -
 1.99995634
 GDF1 [White] 250 points and FM5 [White] 717 points - 1.99995693
 Bati [White] 46 points and GDF2 [White] 467 points - 1.99997902
 Bati [White] 46 points and FM5 [White] 717 points - 1.99998230
 Bati [White] 46 points and FM6 [White] 360 points - 1.99998281
 YSF [White] 309 points and Savane herbacée [White] 788 points -
 1.99998727

Savane arbustive [White] 3826 points and FM1 [White] 727 points - 1.99998915
 Bati [White] 46 points and Foret marecageuse [White] 60 points - 1.99999320
 Bati [White] 46 points and FM1 [White] 727 points - 1.99999454
 FM4 [White] 451 points and Savane arbustive [White] 3826 points - 1.99999520
 GDF2 [White] 467 points and Savane arbustive [White] 3826 points - 1.99999605
 FM6 [White] 360 points and Foret marecageuse [White] 60 points - 1.99999734
 Foret marecageuse [White] 60 points and Savane herbacée [White] 788 points - 1.99999846
 Savane herbacée [White] 788 points and FM1 [White] 727 points - 1.99999863
 FM6 [White] 360 points and Savane arbustive [White] 3826 points - 1.99999897
 GDF1 [White] 250 points and Savane arbustive [White] 3826 points - 1.99999903
 GDF1 [White] 250 points and Savane herbacée [White] 788 points - 1.99999937
 OF [White] 329 points and FM5 [White] 717 points - 1.99999943
 Savane arbustive [White] 3826 points and FM2 [White] 598 points - 1.99999983
 FM6 [White] 360 points and Savane herbacée [White] 788 points - 1.99999992
 Savane arbustive [White] 3826 points and FM5 [White] 717 points - 1.99999995
 Savane arbustive [White] 3826 points and Savane herbacée [White] 788 points - 1.99999999
 Savane herbacée [White] 788 points and FM5 [White] 717 points - 2.00000000
 Foret marecageuse [White] 60 points and Savane arbustive [White] 3826 points - 2.00000000

2- Matrice de confusion

Confusion

Matrix: I:\AfriqueC\ Othorectifiee \Classif\1

Overall

Accuracy 0.96170084 96.17%

Kappa

Coefficient 0.9555

| Class | EVF: | Ground Truth (Pixels) | | | |
|---------------|------|-----------------------|--------------|-----------|-----------|
| | | Layer: sEVF: | Layer: sEVF: | Layer: sE | er: sEVF: |
| Unclassified | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM2 | | 876 | 0 | 0 | 0 |
| FM1 | | 9 | 143 | 0 | 0 |
| savane herbac | | 0 | 0 | 338 | 0 |
| Savanearbusti | | 0 | 0 | 0 | 402 |
| river | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| YSF | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM3 | | 10 | 1 | 0 | 0 |
| OF | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM6 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM5 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Swamp | | 3 | 0 | 0 | 0 |
| FM4 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bati | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| GDF1 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| GDF2 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Total | | 900 | 144 | 338 | 402 |

| Class | EVF: | Ground Truth (Pixels) | | | |
|---------------|------|-----------------------|--------------|-----------|-----------|
| | | Layer: fEVF: | Layer: fEVF: | Layer: fE | er: fEVF: |
| Unclassified | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM2 | | 0 | 35 | 0 | 0 |
| FM1 | | 0 | 10 | 0 | 0 |
| savane herbac | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Savanearbusti | | 0 | 4 | 0 | 0 |
| river | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| YSF | | 30 | 1 | 0 | 0 |
| FM3 | | 1 | 65 | 2 | 0 |
| OF | | 0 | 5 | 172 | 0 |
| FM6 | | 0 | 7 | 0 | 80 |
| FM5 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Swamp | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM4 | | 0 | 2 | 0 | 0 |
| Bati | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| GDF1 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| GDF2 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | | 31 | 129 | 174 | 80 |

| Class | EVF: | Ground Truth (Pixels) | | | |
|---------------|------|-----------------------|--------------|-----------|-----------|
| | | Layer: fEVF: | Layer: fEVF: | Layer: bE | er: GEVF: |
| Unclassified | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM2 | | 4 | 1 | 0 | 2 |
| FM1 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| savane herbac | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Savanearbusti | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| river | | 9 | 0 | 0 | 0 |
| YSF | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM3 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OF | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM6 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM5 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Swamp | | 62 | 0 | 0 | 0 |
| FM4 | | 10 | 502 | 0 | 1 |
| Bati | | 0 | 0 | 7 | 0 |
| GDF1 | | 5 | 0 | 0 | 162 |
| GDF2 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | | 90 | 503 | 7 | 165 |

| Class | Ground Truth (Pixels) | |
|---------------|-----------------------|--|
| | Total | |
| Unclassified | 0 | |
| FM2 | 918 | |
| FM1 | 162 | |
| savane herbac | 338 | |
| Savanearbusti | 406 | |
| river | 209 | |
| YSF | 31 | |
| FM3 | 80 | |
| OF | 177 | |
| FM6 | 87 | |
| FM5 | 106 | |
| Swamp | 65 | |
| FM4 | 515 | |
| Bati | 8 | |

| | |
|-------|------|
| GDF1 | 167 |
| GDF2 | 47 |
| Total | 3316 |

| Class | EVF: | Ground Truth (Percent) | | | |
|---------------|------|------------------------|--------------|-----------|-----------|
| | | Layer: sEVF: | Layer: sEVF: | Layer: sE | er: sEVF: |
| Unclassified | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM2 | | 97.33 | 0 | 0 | 0 |
| FM1 | | 1 | 99.31 | 0 | 0 |
| savane herbac | | 0 | 0 | 100 | 0 |
| Savanearbusti | | 0 | 0 | 0 | 100 |
| river | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| YSF | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM3 | | 1.11 | 0.69 | 0 | 0 |
| OF | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM6 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM5 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Swamp | | 0.33 | 0 | 0 | 0 |
| FM4 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bati | | 0.11 | 0 | 0 | 0 |
| GDF1 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| GDF2 | | 0.11 | 0 | 0 | 0 |
| Total | | 100 | 100 | 100 | 100 |

| Class | EVF: | Ground Truth (Percent) | | | |
|---------------|------|------------------------|--------------|-----------|-----------|
| | | Layer: fEVF: | Layer: fEVF: | Layer: fE | er: fEVF: |
| Unclassified | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM2 | | 0 | 27.13 | 0 | 0 |
| FM1 | | 0 | 7.75 | 0 | 0 |
| savane herbac | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Savanearbusti | | 0 | 3.1 | 0 | 0 |
| river | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| YSF | | 96.77 | 0.78 | 0 | 0 |
| FM3 | | 3.23 | 50.39 | 1.15 | 0 |
| OF | | 0 | 3.88 | 98.85 | 0 |
| FM6 | | 0 | 5.43 | 0 | 100 |
| FM5 | | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | |
|-------|-----|------|-----|-----|
| Swamp | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM4 | 0 | 1.55 | 0 | 0 |
| Bati | 0 | 0 | 0 | 0 |
| GDF1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| GDF2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 100 | 100 | 100 | 100 |

| Class | EVF: | Ground Truth (Percent) | | Layer: bE | er: GEVF: |
|---------------|------|------------------------|--------------|-----------|-----------|
| | | Layer: fEVF: | Layer: fEVF: | | |
| Unclassified | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM2 | | 4.44 | 0.2 | 0 | 1.21 |
| FM1 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| savane herbac | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Savanearbusti | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| river | | 10 | 0 | 0 | 0 |
| YSF | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM3 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OF | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM6 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FM5 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Swamp | | 68.89 | 0 | 0 | 0 |
| FM4 | | 11.11 | 99.8 | 0 | 0.61 |
| Bati | | 0 | 0 | 100 | 0 |
| GDF1 | | 5.56 | 0 | 0 | 98.18 |
| GDF2 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | | 100 | 100 | 100 | 0 |

| Class | Ground Truth (Percent) | |
|---------------|------------------------|--|
| | Total | |
| Unclassified | 0 | |
| FM2 | 27.68 | |
| FM1 | 4.89 | |
| savane herbac | 10.19 | |
| Savanearbusti | 12.24 | |
| river | 6.3 | |
| YSF | 0.93 | |
| FM3 | 2.41 | |
| OF | 5.34 | |

| | |
|-------|-------|
| FM6 | 2.62 |
| FM5 | 3.2 |
| Swamp | 1.96 |
| FM4 | 15.53 |
| Bati | 0.24 |
| GDF1 | 5.04 |
| GDF2 | 1.42 |
| Total | 100 |

| Classes | Commission % | Omission % | Commission (Pixels) | Omission (Pixels) |
|-------------------|--------------|------------|---------------------|-------------------|
| GDF2 | 2.13 | 2.13 | 1/7 | 1/47 |
| GDF1 | 2.99 | 1.82 | 5/167 | 3/165 |
| Bâti | 12.5 | 0 | 1/8 | 0/7 |
| FM4 | 2.52 | 0.2 | 13/515 | 1/503 |
| Forêt marécageuse | 4.62 | 31.11 | 3/65 | 28/90 |
| FM5 | 0 | 1.85 | 0/106 | 2/108 |
| FM6 | 8.05 | 0 | 7/87 | 0/80 |
| OF | 2.82 | 1.15 | 5/177 | 2/174 |
| YSF | 3.23 | 3.23 | 1/31 | 1/31 |
| Rivière | 5.26 | 0 | 11/209 | 0/198 |
| Savane arbustive | 0 | 0 | 4/406 | 0/402 |
| Savane herbacée | 0 | 0 | 0/338 | 0/338 |
| FM2 | 4.58 | 2.67 | 42/918 | 24/900 |
| FM1 | 11.73 | 0.69 | 19/162 | 1/144 |
| FM3 | 18.75 | 49.61 | 15/80 | 64/129 |