

UNIVERSITE DE KISANGANI



B.P. 2012

KISANGANI

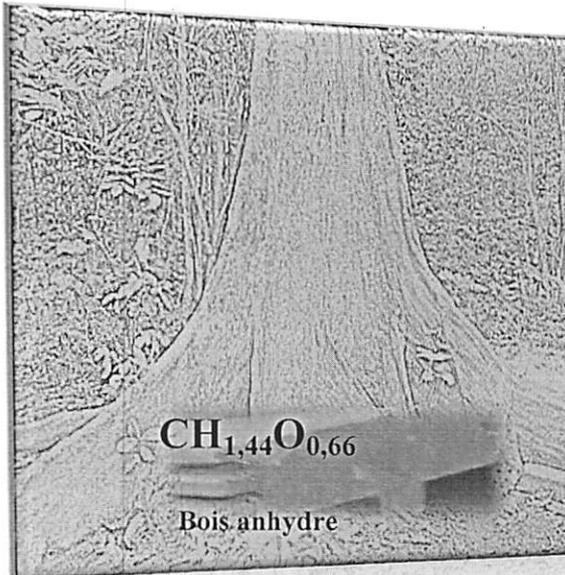
FACULTE DE GESTION DES RESSOURCES NATURELLES
RENOUVELABLES



CARTOGRAPHIE ET CARACTERISATION DU STOCK DE
CARBORNE DE LA RESERVE FORESTIERE DE YOKO

Par

Saddam SADDAM ASSANI



Mémoire présentée et défendue en vue
de l'obtention du grade d'ingénieur
agronome

Option : Eaux et forêts

Directeur : Prof. Mukandama

Encadreur : CT Mikwa

ANNEE ACADEMIQUE : 2013 – 2014

EPIGRAPHE

Certes il y a dans la création des cieux et de la terre, dans l'alternance de la nuit et du jour, dans le navire qui vogue en mer avec ce qui profite aux gens, dans ce que Dieu fit descendre du ciel comme eau avec laquelle il fit revivre la terre après sa mort pour y disséminer ensuite toutes sortes d'animaux, dans la distribution méthodique des vents et dans le nuage soumis entre ciel et terre, il y a dans tout cela des signes pour un peuple doué de raison (Coran : Sourate Al-baqarat, signe 167).

A mon feu père Assani ibn Kisitu Kandole (Que la miséricorde d'Allah soit avec lui) ;

A ma mère Nesy Botongolongo Wasinga (Qu'Allah soit satisfait d'elle) ;

A mes frères et soeurs : Omar, Hussein, Karim, Munir, Bachu, Rahim, Chadia, Gulsum, Kismath ;

Je dédie ce travail.

Saddam SADDAM ASSANI

REMERCIEMENTS

Toutes les louanges appartiennent à Allah le Tout miséricordieux, le Très miséricordieux, qui Seul se suffit de Lui-même, alors que tout dépend de Lui. En guise d'une bienveillance scientifique, d'une patience inlassable, des efforts consentis, d'une collaboration sincère et fructueuse avec les autres chercheurs dans la même zone d'étude ; l'aboutissement de cette dissertation n'avait pas été une asymptote durant la période d'investigation mise à notre disposition. A cet effet, il nous est fervent de concéder notre reconnaissance à toutes les personnes qui d'une façon à une autre ont permis sa réalisation effective.

De prime abord nos remerciements vont à tous les investigateurs dont les données d'inventaire ont été confluées dans cette étude et à la DIAF d'avoir mise à disponibilité les leurs à travers le Professeur Ewango.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude au Professeur Mukandama pour ses remarques, critiques constructives et pour le privilège qu'il nous a accordée à finaliser au plus tôt les analyses biométriques.

Que le Chef des travaux Fiston Mikwa trouve ici le témoignage de notre gratitude pour son encadrement scientifique et de nous avoir fait plonger dans diverse applications des outils de la télédétection qui s'avèrent une aubaine pour les études ultérieures.

Merci à mes parents, frères et sœurs pour leur patience, soutien et leurs encouragements. Mon feu père pour tant de valeurs qu'eusses-je bénéficiées ! Qu'Allah puisse vous accorder la meilleure de récompense !

Nous remercions vivement nos collègues en particulier Nzale Nbiesi, Mabisi Akawa, Kandolo Bahati, Banza Kalala, Ngabo Useni, Boloy Mbale et Christian Lifala pour les peines endurées ainsi que les bons moments passés ensembles dans divers travaux académiques. Nous tenons également à remercier nos familiers, amis et connaissances Merlande B., Asma Mamouda, Yvonne Posho, Christelle Posho, Evo Odimba, Tambwe B., Aziz Hashim,...

Enfin, nous adressons notre gratitude envers les paysans qui ont accepté de nous recevoir dans leurs cases et à Monsieur Obanga pour son accompagnement durant la récolte des points réels ainsi que pour son caractère à exécuter la marche et de partager ses connaissances de plein gré.

RESUME

Cette étude transversale avait pour objectif fondamental de caractériser et d'évaluer le stock de carbone aérien dans les différentes formations végétales de la réserve forestière de Yoko. A cet effet, des descentes sur terrain s'étaient déroulées pendant la dernière décade du mois de juin pour superviser les campagnes d'inventaire, récolter des points réels, valider et faire le point des zones d'entraînement.

Par l'utilisation de la composite colorée des bandes 4,5 et 6 de Landsat 8 du 16 Avril 2014 et d'une classification supervisée, sept classes d'occupation du sol ont été retenues à savoir la forêt primaire mixte, la forêt à *Gilbertiondendron dewevrei*, la forêt secondaire, la jachère et forêt dégradée, la surface d'eau, les abattis-cultures et les sols nus. Ce faisant, la validation des classes d'occupation a été examinée par la matrice de confusion, le calcul de l'indice de Tucker (NDVI) et la photo-interprétation. Les variables dendrométriques retenus pour cette étude ont été le stock de carbone, la surface terrière et la densité relative.

La matrice de confusion des classes d'occupation du sol dénote que la valeur de l'indice Kappa est de 55,95 %, ce qui les fait valoir le seuil d'une classification modérée. Au-delà dudit seuil de classification atteint et de la contribution spécifique indépendamment des classes par rapport aux variables dendrométriques se situant à un seuil de similarité de 56,84 %, les classes d'occupation du sol constituent également des unités distinctes en potentiel de stockage d'après le test de Khi-carré sous un seuil de probabilité $p < 0.001$.

Les stocks de carbone moyens à l'hectare dans la forêt primaire mixte, la forêt à *G. dewevrei*, la forêt secondaire, la jachère et la forêt dégradée sont respectivement de 221,75, 397,47, 217,82, et 141,32 tonnes. Ces classes peuvent être différenciées sur base principalement des variables : stock de carbone et densité relative et leur différence repose essentiellement sur les apports distingués des espèces telles que le *Gilbertiondendron dewevrei*, le *Scorophoueus zenkeri*, le *Gilbertiondendron kisantuens* et le nombre de grands arbres.

Mots-clés : Yoko, Classification, NDVI, Carbone.

SUMMARY

This transverse survey had for objective fundamental to characterize and to value the aerial carbon stock in the different vegetation formations in the forest reserve of Yoko. To this effect, coming down on land had taken place during the last decade of the month of June to supervise the campaigns of inventory, to harvest the real points, to validate and to make the point of the practice zones.

By the use of the composite colored of the strips 4,5 and 6 of Landsat 8 April 15, 2014 and a classification supervised, seven classes of soil occupation have been kept to know the mixed primary forest, *Gilbertiondendron dewevrei* forest, the secondary forest, the fallow and forest damaged, the surface of water and the naked soils. That making, the validation of the occupation classes has been examined by the matrix of confusion, calculation of vegetation index (NDVI) and the photo-interpretation. Biometric variables kept for this survey was the stock of carbon, the surface terrière and the relative density.

The matrix of confusion of the classes of soil occupation denotes that the value of Kappa index is 55,95%, what puts forward them the doorstep of a moderate classification. Beyond of the aforesaid doorstep of classification reaches and of the specific contribution independently of the classes in relation with variables being located at a doorstep of similarity of 56,84%, classes of soil occupation also constitute distinct units in potential of storage according to the test of Khi - Square under a doorstep of p probability <0.001.

The middle stocks of carbon to the hectare in the mixed primary forest, *G. dewevrei* forest, the secondary forest, the fallow and the forest damaged is respectively of 221,75 t, 397,47 t, 217,82 t/ha and 141,32 t. These classes can be differentiated mainly on basis of the variables: stock of carbon and relative density and their difference essentially rests on the contributions distinguished of the species as *Gilbertiondendron dewevrei*, *Scorophoueus zenkerie*, *Gilbertiondendron kisantuens* and the number of big trees.

Key words : Yoko, Classification, NDVI, Carbone.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

AGB	: Above Ground Biomass
AP	: Aire Protégée
APV-FLEGT	: Accord de Partenariat Volontaire-Forest Law Enforcement Governance and Trade
CEA	: Commissariat à l'Energie Atomique et aux énergies alternatives
CF	: Code Forestier
CFT	: Compagnie Forestière de Transformation
CNRS	: Centre National de la Recherche Scientifique
DHP	: Diamètre à la Hauteur de Poitrine
DIAF	: Direction d'Inventaire et d'Aménagement Forestier
DEP	: Direction de l'Environnement Forestier
FGRNR	: Faculté de Gestion des Ressources Naturelles Renouvelables
FS	: Faculté des sciences
GES	: Gaz à Effet de Serre
GPS	: Global Position System
ICCN	: Institut Congolais de la Conservation de la Nature
INEAC	: Institut National pour l'Etude Agronomique du Congo
LAI	: Leaf Area Index
LSCE	: Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
LULUCF	: Land Use, Land Use Change and Forestry
MECNT	: Ministère de l'Environnement, Conservation de la Nature et Tourisme
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NDVI	: Normalised Difference Vegetation Index
OLI	: Operational Land Imager

ONG	: Organisation Non Gouvernementale
PFNL	: Produit Forestier Non Ligneux
REAFOR	: Relance de la Recherche Agronomique et Forestière
REDD⁺	: Réduction des émissions dues à la déforestation, la dégradation forestière et à la conservation, la gestion durable des forêts et l'augmentation des stocks
RF	: Réserve Forestière
SODAC	: Société de l'Arbre du Québec
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
TIRS	: Thermal Infrared Sensor
UNESCO	: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UNIKIS	: Université de Kisangani
USDA	: United States Department of Agriculture
UVSQ	: Université de Versailles-St-Quentin
WHRC	: Woods Hole Research Center
WRI	: World Resources Institute

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1** : Évolution de la concentration atmosphérique du CO₂.
- Fig. 2** : Spectre électromagnétique de la lumière blanche.
- Fig. 3** : Le principe de la télédétection passive et active.
- Fig. 4** : Influence de la structure cellulaire des feuilles sur leur signature spectrale
- Fig. 5** : Illustration de la théorie probaliste Bayésienne.
- Fig. 6** : Localisation de la réserve forestière de Yoko.
- Fig. 7** : Modelé topographique de la région de Kisangani.
- Fig. 8** : Diagramme ombrothermique de Kisangani.
- Fig. 9** : Etapes de la classification supervisée.
- Fig. 10** : Repartition des points d'inventaire sur la zone d'étude.
- Fig. 11** : *La proportion relative de carbone (C), d'Eau (H₂O), et d'autres éléments.*
- Fig. 12** : Comportements spectraux des régions d'intérêt.
- Fig. 13** : Stratification de la région forestière de Yoko.
- Fig. 14** : Différentes valeurs de NDVI dans la région forestière de Yoko.
- Fig. 15** : Identification des caractéristiques et d'utilisation du sol dans la R.F. de Yoko.
- Fig. 16** : Distribution spatiale des individus au long des composantes principales I et II.
- Fig. 17** : Distribution spatiale des classes au regard des variables originelles.
- Fig. 18** : Stocks de carbone au bassin du Congo.
- Fig. 20** : Graphe de distribution des classes de diamètre pour l'échantillon d'arbres de la forêt primaire mixte.

Fig. 19 : Graphe de distribution des classes de diamètre pour l'échantillon d'arbres de la forêt secondaire.

Fig. 22 : Graphe de distribution des classes de diamètre pour l'échantillon d'arbres de la forêt dégradée et la jachère.

Fig. 21 : Graphe de distribution des classes de diamètre pour l'échantillon d'arbres de la forêt à *G. dewevrei*.

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1.** Caractéristiques des bandes spectrales de Landsat 8.
- Tableau 2.** Outils de recolte et de sauvegarde des données.
- Tableau 3.** Logiciels utilisés pour le traitement et analyses SIG.
- Tableau 4.** Echelle qualitative définissant la précision de classification en fonction des valeurs de coefficient kappa.
- Tableau 5.** Les points d'inventaires par classes d'occupation du sol.
- Tableau 6.** Mesure de séparabilité des classes d'occupation du sol.
- Tableau 7. Matrice de confusion des classes d'occupation du sol de la R.F. de Yoko.*
- Tableau 8.** Contribution des composantes principales sur la variabilité totale et corrélation entre les composantes et les variables analysées.
- Tableau 9.** Résultat de l'Analyse Factorielle Discriminante pour les variables quantitatives des classes d'occupation du sol.
- Tableau 10.** Corrélation entre les fonctions discriminantes et les variables originelles.
- Tableau 11.** Moyennes des variables en fonction des classes.
- Tableau 12.** Comparaison des résultats avec ceux des autres systèmes.

INTRODUCTION

0.1. Problématique

Les aires protégées de la République Démocratique du Congo couvrent près de 10 millions d'hectares, répartis sur 8,5 % de la superficie du pays. Elles comptent sept parcs nationaux et trois réserves de biosphère, et sont complétées par plusieurs dizaines de réserves de faune et de chasse. Ensemble, elles abritent près de 500 espèces de mammifères, 1.000 espèces d'oiseaux, 350 espèces de reptiles et plus de 200 espèces de batraciens. Elles forment une mosaïque unique au monde, essentielle à de nombreux égards non seulement par les écosystèmes et la biodiversité qu'elles abritent, mais aussi en raison des réservoirs génétiques majeurs qu'elles renferment, et de leur contribution globale à l'économie locale et nationale ainsi qu'aux équilibres environnementaux de la planète (Croiser et Trefon, 2007a).

Au regard des problèmes qui minent la bonne gestion des forêts congolaises, la politique actuelle du gouvernement congolais est d'étendre la superficie des AP de 9 % à 15 % du territoire national (Mate, 2014). Au grand remord, celles-ci ne font pas exception des zones de déforestation et/ou de dégradation d'origine anthropique, alors que le stock du carbone forestier n'augmente que lorsque la croissance des arbres dépasse la récolte de bois et que l'aire forestière s'agrandit. Tchatchambe (2012a) révèle que la forêt dense à sol hydromorphe et la dense sur terre ferme sur un total de 24,0624 km² suivent une vitesse de dégradation de près de 2,40624 km²/an à la réserve forestière de Yoko. En sus, Tumba (2013a) note une observation apparentée sur la dynamique de l'occupation du sol. La classe agriculture et sol nu, qui en 1984 occupait seulement 8.67% est passée à 18.01% en 2010.

Il est irréfutable qu'à ces jours, la gestion durable des forêts est renforcée par les liens entre forêts et changement climatique. À travers le processus de photosynthèse, l'arbre capte et séquestre du carbone. Celui-ci est un composé du dioxyde de carbone (CO₂) qui est un gaz à effet de serre (GES) notoire (Joannidis, 2010a). Dans l'optique que la RDC se trouve de concert avec les autres pays dans le marché international, Elle s'est résolument engagée à ratifier plusieurs conventions, accords internationaux et régionaux ainsi que le lancement des initiatives nationales en particulier un accord de partenariat volontaire (APV-FLEGT) en vue de lutter contre l'exploitation et le commerce illégal du bois congolais, l'aménagement de son domaine forestier...

Or, les imprécisions sur la biomasse jouent autant sur les estimations de flux de carbone que les imprécisions sur le taux de déforestation. En régions tropicales, une incertitude d'environ de 50 % sur la biomasse moyenne entraîne une incertitude d'environ 80 % dans l'estimation des flux de carbone. La connaissance de l'évolution des divers flux de carbone dans un écosystème forestier est essentielle, si on vise à optimiser les fonctions de puits et de réservoir de carbone de cet écosystème (DEF, 1996).

Le Bassin du Congo représente 15% du stock de carbone forestier mondial, les informations disponibles sont souvent éparées, difficiles d'accès et peu fiables (Modimea, 2013). En outre, selon une étude internationale ayant compilé les mesures du carbone absorbée par les forêts, sur toute la planète, entre 1990 et 2007. L'étude, à laquelle participaient des chercheurs du laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE, CNRS/CEA/UVSQ), le bilan du carbone est presque nul sur l'ensemble des régions tropicales du fait de la déforestation, car ces forêts constituent un puits de carbone annuel de 1,2 milliard de tonnes de carbone, contrebalancé par l'émission de 1,3 milliard de tonnes (Pan et *al.*, 2011).

La déforestation n'est pas le seul facteur à prendre en compte dans l'évaluation des échanges de carbone liés aux modifications des écosystèmes forestiers tropicaux. Il importe pour la réserve forestière de Yoko de recourir à la télédétection en tant qu'outil d'appui en considération de son hétérogénéité spécifique, sa fragmentation spatio-temporelle et de l'importance de son réseau hydrographique. D'autant plus que, l'analyse diachronique des images satellitales Landsat dévoile une dégradation centrifuge et centripète de l'écosystème forestier. En raison de quoi, cette étude procède par une cartographie supervisée de différentes formations végétales de la R.F. de Yoko et la géolocalisation des différents points d'inventaire. Ce faisant, faudra t-il ouvrir une brèche à une analyse spatio-temporelle par la modélisation du stock de carbone !

0.2. Hypothèses

- ◆ Les classes d'occupation du sol retenues seraient différenciées aussi en stock de carbone malgré le seuil de la classification supervisée atteint (indice Kappa).
- ◆ La variation du stock de carbone inter classes d'occupation du sol dépend essentiellement de la contribution spécifique.

0.3. Objectifs du travail

- ◆ Cartographier les différentes formations végétales de la réserve forestière de Yoko.
- ◆ Evaluer les paramètres dendrométriques des classes d'occupation du sol.

0.4. Intérêt du travail

Ce présent travail met à jour la carte de la végétation de Yoko et ouvre une brèche à l'analyse spatiale du stock de carbone aérien. Il laisse entrevoir une évolution progressive de différents types forestiers et un potentiel de stockage futur compte tenu des paramètres structuraux intrinsèques. Enfin, les résultats génèrent des suggestions intéressantes pour des études ultérieures.

0.5. Subdivision du travail

Outre l'introduction, le premier chapitre de ce travail présente les généralités sur le carbone forestier. Le second chapitre présente une description biophysique détaillée de la R.F. de Yoko et l'approche méthodologique. La présentation des résultats obtenus et leurs discussions parachutent au troisième chapitre. Enfin, une conclusion et des suggestions mettent fin à cette dissertation.

TRAVAUX ANTERIEURS

❖ Partant de la méthode pédoanthracologique dans deux sites en forêt primaire et secondaire respectivement des réserves forestières de Yoko, Masako et de Yangambi, il a été constaté la présence de charbons de bois bien stratifiés dans toutes les couches de sol. Ce qui traduit l'évolution de la végétation ligneuse qui a subi des feux répétés au cours du temps, les forêts secondaires de la région de Kisangani présentent un cycle normal de l'évolution car les charbons de bois ont été collectés dans presque toutes les couches (Tshibamba, 2009).

❖ Un réseau de 79 laboratoires installés dans dix pays d'Afrique a permis de montrer, sur la période 1968-2007, que « l'absorption de carbone par les arbres de ces régions s'est accrue dans des proportions comparables à celle enregistrée pour la forêt amazonienne, soit 0,63 tonne par hectare par an » ; soulignent les chercheurs. Les forêts tropicales réduisent ainsi le taux du CO₂ dans l'atmosphère notent les chercheurs en soulignant la nécessité de les protéger, car le CO₂ est le principal gaz responsable du changement climatique. Les forêts tropicales, qui couvrent de 7 à 10% des terres de la planète, pourraient stocker, selon les estimations des scientifiques, de 40 à 50 % du CO₂ présent dans la végétation.

Elles sont donc « un élément critique, mais très mal quantifié, du cycle de carbone » », constatent les auteurs de l'étude. Selon Hélène Muller-Landau, une spécialiste de l'Institut de Recherche Tropicale Smithsonian au Panama, considère que l'augmentation de l'absorption du CO₂ par les forêts africaines peut avoir deux explications : soit elles ont subi de graves dommages (incendies...) dans le passé et sont actuellement dans une phase de repousse, soit elles ont été perturbées par les changements climatiques et atmosphériques récents et sont en transition (Smithsonian, 2010).

❖ Deux cartes d'occupation du sol ont été établies pour les années 2001 et 2010 avec 7 classes: Eau, Forêt dense à sol hydromorphe, Forêt dense sur terre ferme, Forêt secondaire, Complexe jachères et champs, Sol nu et milieu habité, Plantation et autre. Ces cartes de la Réserve Forestière de Yoko et ses environs mettent en évidence les changements du couvert forestier et sa dégradation sous les pressions anthropiques spécialement dans la partie nord de la forêt et dans sa périphérie. Au total, 24,0624 km² de forêt dense sur terre ferme et forêt dense à sol hydromorphe ont été dégradés ou remplacés par des cultures, soit une vitesse de dégradation de près de 2,40624 km²/an (Tchatchambe, 2012b).

❖ Quatre cartes d'occupation du sol ont été établies pour les années 1984, 1994, 2001 et 2010: forêt primaire, forêt secondaire, jachère, et zone couvert par l'agriculture et sol nu. Ces cartes d'occupation des sols de la réserve forestière de YOKO mettent en évidence les changements du couvert forestier. Nous avons constaté à la fin de compte que, avec une couverture de 46.58% de zone d'étude en 1984, la forêt primaire passe à seulement 32.59% en 2010 ; les restes de la surface occupé par cette classe, forêts primaire, ont été dégradés et converti en forêt secondaire, en jachère et en zone de l'agriculture et sol nu. Ce constat se fait voir aussi dans la classe forêt secondaire, mais quant aux jachères et agriculture et sol nu, c'est la tendance inverse qui se fait voir avec par exemple pour la classe agriculture et sol nu, qui en 1984 occupait seulement 8.67% de la zone d'étude, occupe 18.01% de cette zone en 2010 (Tumba, 2013b).

CHAPITRE I: GENERALITES SUR LE CARBONE FORESTIER

1.1. Chiffres-clé sur les forêts et principales causes de la déforestation en RDC

La forêt est définie comme la classe d'occupation du sol forêt adoptée par la RDC au regard des négociations climat. Elle se définit par une superficie minimale de 0,5ha, un couvert arboré minimal de 30% et des essences d'arbres pouvant atteindre une hauteur potentielle à maturité de 3 m minimum. La déforestation est définie comme un passage d'une classe d'occupation du sol forêt à une classe d'occupation du sol non-forêt (pâturages, terres cultivées, etc.). La dégradation est définie comme une réduction du volume de biomasse forestière sur une même surface de sol définie comme forêt (forêt restant forêt mais avec un stock de carbone réduit) (MECNT, 2012a).

La définition varie car le protocole de Kyoto permet aux pays de spécifier une définition précise à l'intérieur de ces paramètres utilisable pour la prise en compte des émissions à l'échelon national. Les forêts représentent 30 % de la surface émergée du globe (près de 4 milliards d'hectares). Sa teneur totale en carbone (638 gigatonnes pour 2005, soit 25 % du carbone dans la biosphère terrestre) est plus grande que la quantité de carbone dans toute l'atmosphère. Contenu carbone dans un arbre (ex. palissandre de 30 m de haut et de 80 ans) : 5,4 tonnes de CO₂, soit les émissions d'un vol de 600 km en Airbus A320, ou l'élevage de 16,7 bœufs à viande, ou un tour du monde en voiture (44 000 km) ou la production de 13,4 tonnes de blé. Selon les experts, 13 millions d'hectares de forêts disparaissent dans le monde chaque année, entraînant des dommages écologiques irréversibles et menaçant le mode de vie des sociétés humaines qui en dépendent directement (Joannidis, 2010b).

Les principaux résultats des deux études qualitatives ont permis d'identifier les causes directes et sous-jacentes de la déforestation perçues comme les plus importantes **au niveau national** en RDC. Les principales causes directes perçues par les deux enquêtes qualitatives sont : **l'agriculture itinérante sur brûlis (première cause pour les deux études), l'exploitation artisanale de bois, le bois énergie et la production de charbon de bois et enfin l'exploitation minière**. Ces causes sont légales ou illégales, pratiquées par les populations locales pour subvenir à leurs besoins alimentaires et/ou monétaires, parfois pratiquées à grande échelle et/ou à grande intensité (MECNT, 2012b).

1.1.1. Réservoir total de carbone et rejet dans l'atmosphère

La masse totale de carbone serait comprise, selon les estimations, entre 20 000 et 50 000 milliards de tonnes. Le carbone fossile représente 22 p. 100 de la quantité totale. Les océans contiennent 74 p. 100 du carbone de la planète, dont 71 p. 100 sous forme d'ions (bicarbonates et carbonates) et 3 p. 100 sous forme de matière organique morte ou de phytoplancton. Les écosystèmes terrestres, au sein desquels les forêts constituent le principal réservoir, renferment environ 3 p. 100 du carbone total. L'atmosphère ne contient que le 1 p. 100 restant, qui circule librement et est utilisé par la photosynthèse (Encarta, 2009a).

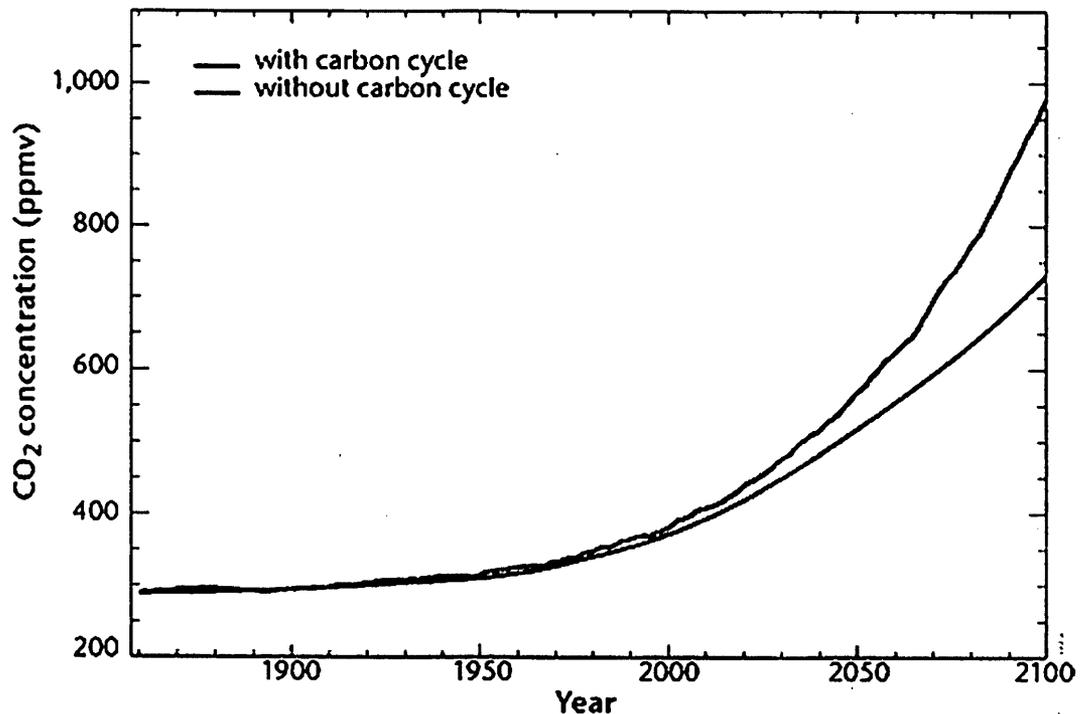


Fig. 1 : Évolution de la concentration atmosphérique du CO₂ (ppmv).

Source : Jean-Marc, 2001a.

Ces deux courbes représentent respectivement la concentration en CO₂ dans l'atmosphère si on suppose que la capacité d'absorption des écosystèmes terrestres reste intacte (courbe noire), et cette même concentration si on prend en compte l'affaiblissement du puits continental puis son passage comme source sous l'effet de la modification du climat (courbe rouge). En raison de la combustion des fossiles et du déboisement des forêts, la quantité de CO₂ dans l'atmosphère augmente depuis la révolution industrielle. On estime que les concentrations atmosphériques sont passées de 260 à 300 ppm à l'époque préindustrielle à plus de 350 ppm aujourd'hui (croissance de 1.5 ppm/an).

Cette augmentation ne représente que la moitié des quantités de dioxyde de carbone répandues dans l'atmosphère. Les 50 p. 100 restants ont probablement été absorbés et stockés par les océans. Bien que la végétation terrestre puisse absorber une quantité considérable de carbone, elle constitue également une source supplémentaire de CO₂ (Encarta, 2009b).

1.1.2. La captation et la séquestration du carbone par les forêts

Les concepts de captage et de séquestration du carbone sont intimement liés. Le captage (ou stockage) du carbone par l'arbre est la quantité de carbone accumulée dans sa biomasse. Il s'exprime par kg/arbre ou par kg/ha, et aussi par aire géographique (tonne/hectare et tonne/hectare/arbre) tandis que la séquestration, (ou fixation) du carbone est la quantité de carbone captée incorporée dans la biomasse de l'arbre. Elle s'exprime par kg/an, ou kg/jour (SODAC, 2002). Pour les écosystèmes terrestres, c'est le sol qui contient l'essentiel du carbone, y compris pour les systèmes forestiers : le gros stock de carbone dans une forêt est... sous la surface. Il s'agit à la fois de parties de plantes ou débris de plantes (racines, bois mort ou feuilles mortes, humus) et d'organismes vivants (microbes, champignons, vers de terre...). Pour le moment, dans un écosystème à maturité, la décomposition des débris organiques du sol conduit à des émissions de gaz carbonique qui compensent globalement l'absorption de gaz carbonique par les plantes.

Si l'homme n'a pas créé le cycle du carbone, il y a rajouté "ses" échanges qui font toute la différence dans le cadre du changement climatique. Il y a d'abord des rajouts directs : l'émission dans l'atmosphère d'environ en moyenne 8 Gt par an due à la combustion des énergies fossiles et à la production de ciment. En sus, 1,5 Gt environ due à la déforestation. L'essentiel de cette dernière est due à du défrichage pour obtenir de nouvelles terres à vocation agricoles (champs ou pâtures), ce qui engendre deux flux de CO₂ : l'essentiel du bois coupé en pareil cas est brûlé, ce qui concourt directement à des émissions de CO₂. En outre, une fois que la terre est utilisée comme champ, le labourage expose plus fréquemment l'humus à l'air (et plus précisément à l'oxygène de l'air), et cela accélère la décomposition de ce dernier (en fait cela augmente la respiration des micro-organismes aérobie, ce qui n'est pas très étonnant !), avec pour résultat que la teneur en carbone d'un sol cultivé est bien plus basse que celle d'un sol de forêt, ou même de prairie (qui n'est pas labouré), la différence étant alors partie dans l'atmosphère (Jean-Marc, 2007b).

Les processus d'échange de carbone entre l'atmosphère, la végétation et le sol sont la photosynthèse, la respiration autotrophe et la respiration hétérotrophe. La photosynthèse permet à la végétation d'absorber le CO₂ de l'atmosphère. La respiration autotrophe représente l'ensemble des processus métaboliques qui, chez les arbres, provoquent une libération de CO₂ dans l'atmosphère. La respiration hétérotrophe est la libération de CO₂ dans l'atmosphère causée par les activités des organismes qui ne font pas de photosynthèse. La respiration hétérotrophe qui se déroule principalement dans le sol est due à l'activité microbienne qui transforme le matériel organique en CO₂. L'importance relative de la photosynthèse vis-à-vis les diverses formes de respiration détermine si l'écosystème forestier est un puits, une source de carbone ou s'il est en équilibre avec l'atmosphère sur le plan des échanges de carbone.

Un écosystème forestier est considéré comme un puits de carbone lorsque, pour une période donnée, la quantité de CO₂ absorbé par la photosynthèse est supérieure à la quantité libérée par la respiration autotrophe et la respiration hétérotrophe. Si la quantité de CO₂ libéré est supérieure à la quantité absorbée, l'écosystème forestier est, pour une période donnée, considéré comme une source de carbone. Plus l'arbre grandit, plus il séquestre du CO₂ (Thompson et *al.*, 2004). Il est donc considéré comme un puits de carbone. Par contre, une fois sa maturité atteinte, l'absorption et les rejets s'équilibrent au point où l'arbre ne peut plus être considéré comme un puits net de carbone.

1.1.3. Estimation des stocks de carbone aériens

Le protocole de mesurage pour toute campagne de terrain doit préciser quels arbres dans un échantillonnage de terrain doivent être mesurés. Par exemple, dans les protocoles utilisés pour obtenir des estimations de la biomasse forestière aérienne et de carbone, il est recommandé que tous les arbres vivants plus grands ou égaux à 5 cm de diamètre soient mesurés. Un seuil de 5 cm assure que la majorité des arbres qui contribuent à l'AGB totale du terrain soient inclus dans l'estimation finale. Les jeunes arbres de moins de 5 cm de diamètre ne sont souvent pas mesurés parce qu'ils ont tendance à avoir très peu de biomasse globale et sont souvent trop nombreux pour être efficacement mesurés. Par ailleurs, les protocoles devraient indiquer oui ou non les lianes, les vignes, les palmiers et / ou les arbres morts sur pied sont à mesurer. Les lianes, les vignes et les palmiers ont tendance à avoir des densités de bois plus basses et, par conséquent, il y a baisse de biomasse par rapport aux autres espèces d'arbres.

1.1.4. Les statuts des forêts de la RDC

Il existe trois catégories de forêts : forêts classées, forêts protégées et forêts de production permanente. Elles sont la propriété de l'état. Mais ce droit de propriété n'est pas exclusif comme c'est le cas en matière foncière. Sous réserve de certaines conditions, le code Forestier autorise, en effet, aux concessionnaires ou aux communautés locales d'être propriétaires des forêts naturelles ou plantées comprises dans leurs concessions ou qu'elles possèdent en vertu de la coutume (articles 7 à 9 et 22 CF). En définitive, la concession foncière diffère de la concession forestière dans la mesure où un propriétaire forestier n'est pas toujours le propriétaire foncier et vice-versa (Croiser et Trefon, 2007b).

1.1.5. La lutte contre le changement climatique et la croissance économique

Après avoir lancé le premier volume de son rapport Stern en ce qui concerne l'économie sur le changement climatique en 2006, qui avait pour but de faire plancher les économistes afin d'évaluer le coût des impacts liés à l'accroissement des températures. Le deuxième volume de son rapport s'axera sur une nouvelle mission qui retracera la voie d'une croissance économique compatible avec la lutte contre le réchauffement. L'économiste britannique Nicholas Stern s'explique en disant que pour remédier au changement climatique, il faudrait prendre en compte la croissance des émissions polluantes, la crise économique ainsi que les progrès technologiques. D'après un expert de la London School of Economics, si des mesures ne sont pas prises pour freiner le dérèglement climatique, d'ici 2050, il faudrait alors au moins 5500 milliards d'euros pour régler la situation (Stern, 2006).

L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, qui engendrent des variations climatiques, est un des problèmes les plus sérieux pour l'humanité. En régions tropicales, cette situation est notamment liée à divers facteurs de dégradation et de disparition des forêts. Le makala consommé à Kinshasa provient à 52% de l'agriculture sur brûlis et à 32% de l'exploitation des forêts naturelles, des forêts-galeries dégradées situées le long des rivières. La demande ne cesse de croître. En 2001, 80% des besoins énergétiques domestiques du Congo étaient couverts par le bois de chauffe et le makala et, en 2007, le bois couvrait 92% de la consommation énergétique totale du pays. La destruction des forêts par les charbonniers a affecté notamment le Jardin Botanique de Kisantu, la Réserve de Biosphère de Luki et même le prestigieux Parc National des Virunga où les milices ont pris le contrôle des réseaux très rentables de makala pour fournir du bois-énergie à la ville de Goma (Misser, 2013).

Dans les seules villes de Kinshasa et Kisangani, se vend annuellement l'équivalent de 4.9 millions de mètres cubes de bois-énergie ; ce qui représente plus de 12 fois le volume annuel de la production nationale officielle de bois d'œuvre estimé à 400 000 mètres cubes A Kinshasa, le marché du charbon de bois est estimé en valeur de 143 millions \$ soit trois fois la valeur des exportations nationales de bois d'œuvre estimée à 46 millions \$ cette même année La demande considérable résulte de l'absence de politique énergétique prenant en considération la nécessité de protéger les écosystèmes du pays, la détérioration des infrastructures hydro-énergétiques existantes est partiellement en cause

Par ailleurs, le mécanisme de la REDD + des forêts tropicales propose de rémunérer les pays tropicaux qui réduisent leur taux de déforestation sur une période donnée, avec des crédits carbone (unité correspondant à une tonne d'équivalent CO₂ (dioxyde de carbone) sur les marchés du carbone. Le paiement d'un projet REDD n'a lieu que s'il est démontré que le stock de carbone a bien été maintenu sur pied. En pratique, ce paiement se fait après quelques années car la vérification, qui est un processus onéreux, ne peut être faite chaque année. Le montant est payé en fonction de la différence entre le carbone qui serait conservé dans le cas d'un scénario de référence (en général diminution des stocks en raison de pratiques inappropriées) et le carbone qui est réellement conservé grâce au projet REDD. La valeur des crédits carbone de déforestation évitée sur le marché carbone était de 5 \$/tCO₂ eq en 2012 (Marien et *al.*, 2013).

1.1.6. Fond fiduciaire pour la conservation des aires protégées de la RDC

Une Revue Institutionnelle de l'Institut Congolais pour la Conservation de la Nature (ICCN), en charge de la gestion de ce réseau d'aires protégées a, entre autres, identifié l'importance de mettre en place un mécanisme de financement durable pour assurer le fonctionnement de ce réseau à travers la création d'un fonds fiduciaire pour la conservation. Cette recommandation se base, entre autres, sur les résultats positifs obtenus par des projets similaires en Afrique, tels que la Fondation pour la Biodiversité et les Aires Protégées à Madagascar, la Fondation Internationale du Banc d'Arguin (Afrique de l'Ouest) ou encore, plus près dans la région, la Fondation pour le Tri-National de la Sangha (Cameroun, République du Congo, République Centrafricaine), créée au début de l'année 2007. Les étapes nécessaires sont proposées pour définir le profil du fonds afin d'en établir clairement les caractéristiques fondamentales et de servir d'outil de marketing vis-à-vis des fondateurs et partenaires potentiels.

Un fonds fiduciaire peut être défini, de manière générale, comme une somme d'argent ou un ensemble de biens qui (a) ne peuvent être utilisés que pour atteindre un ou plusieurs objectif(s) spécifique(s), (b) doivent être maintenus séparés d'autres sources financières, et (c) sont gérés et contrôlés par un Conseil d'Administration indépendant.

Des fonds fiduciaires pour la conservation ont été établis dans plus de cinquante pays afin d'assurer le financement à long terme d'objectifs différents tels qu'une aire protégée particulière, un réseau complet d'aires protégées d'un pays, une aire protégée transnationale, la conservation d'une espèce particulière ou l'octroi de petites subventions à des communautés ou des ONG locales menant des projets de conservation.

La Revue Institutionnelle recommande de créer une Fondation internationale, dont les revenus du capital placé sur des marchés financiers internationaux permettront de financer de manière pérenne des actions de conservation dans le pays. Une étude réalisée par l'UNESCO en 2002 a déjà démontré la faisabilité d'une telle initiative en ce qui concerne les cinq Sites du patrimoine mondial du pays. Si l'on se réfère aux facteurs considérés comme importants pour la création de fonds fiduciaires pour la conservation tels que définis par le Fonds pour l'Environnement Mondial il y a quelques années, les perspectives de succès pour la création d'un tel mécanisme au bénéfice des aires protégées en RDC apparaissent effectivement très positives (Croiser et Trefon, 2007c).

1.1.7. Les alternatives autour des puits de carbone et la gestion des forêts

La technique de captage et stockage du CO₂ est une des solutions pour réduire la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Le Giec l'a confirmé. Mais qu'en est-il des risques ? Enterrer des millions de tonnes de dioxyde de carbone entre 1 000 et 5 000 mètres sous terre, est-ce dangereux pour l'homme et la nature ? Pour l'association écologiste Greenpeace, « rien ne permet de garantir une conception et une gestion adéquates de ces lieux de stockage en fonction de l'échelle de temps requise. » Une chose est sûre. A forte concentration, le CO₂ est un gaz nocif voire mortel. La catastrophe naturelle qui s'est produite en 1986 au lac Nyos au Cameroun, l'a tristement rappelé lorsqu'un kilomètre cube de CO₂ s'est brusquement échappé de l'eau, provoquant la mort de quelque 1700 personnes (Camille, 2009).

Le GIEC, avait rendu en 2000 un rapport sur les activités Land Use, Land Use Change and Forestry "LULUCF". L'agroforesterie en milieu tropical (éligibles pour les pays hors Annexe 1) fait partie de cette liste d'activités anthropiques additionnelles, avec un potentiel net de séquestration élevé de 586 Mt C/an si 30% des 630 millions d'hectares ciblés étaient convertis.

Comment alors, un projet agroforestier pourrait faire valoir sa contribution à l'atténuation du changement climatique ? En agroforesterie, les arbres se distinguent par 2 aspects :

- Leur enracinement est plus profond. En effet, du fait de l'environnement cultivé et de son relatif isolement, les racines des arbres agroforestiers descendent plus profondément dans les couches du sol que celles des arbres forestiers (Mulia et Dupraz, 2005).
- Les arbres agroforestiers sont des arbres de pleine lumière et bénéficient d'un environnement qu'il leur est favorable (fertilisation de la culture, faible concurrence entre eux, travail du sol) (Dupraz et Liagre 2008). Si l'on compare un arbre agroforestier avec un arbre forestier, le résultat est surprenant : sur les parcelles expérimentales, on mesure des croissances en diamètres beaucoup plus rapides en agroforesterie, conduisant à des biomasses par arbre 2 à 3 fois plus élevées pour les arbres agroforestiers adultes. De plus, une croissance régulière produit un bois de qualité recherchée.

De ce fait les systèmes agroforestiers, outre leurs bénéfices environnementaux et productifs, représentent un outil intégré pour la séquestration de carbone en agriculture. D'autant plus que le carbone séquestré par les systèmes agroforestiers pourrait être acheté et échangé sur le marché européen du carbone. L'occupation et la gestion des sols sont directement liées à la capacité de ceux-ci à pouvoir emmagasiner du carbone, soit temporairement dans la biomasse, soit plus durablement dans les sols. Les forêts, les plantations et les arbres champêtres, sont ainsi des puits potentiels de carbone.

L'exploitation forestière permet de soustraire les vieux pieds ou pieds majeurs dont les capacités de séquestration sont relativement réduites. Ainsi, elle favoriserait l'existence des trouées occasionnées par l'abattage des arbres ou de chablis multiple. En sus, l'utilisation du bois à la fin de la vie de l'arbre comme meuble ou matériau de construction retarde le moment où le carbone sera relâché (Novak et *al.*, 2002).

Cependant, elle n'est pas pour autant prometteuse sans une réglementation et une suivie de la régénération. La politique forestière en France visant à "dynamiser" la sylviculture pour rajeunir les peuplements forestiers au nom de la lutte contre les effets du réchauffement climatique est remise en cause par des travaux récents. Ceux-ci révèlent que l'augmentation des coupes et le raccourcissement des rotations entraîneraient en effet une ouverture importante de la canopée et donc une altération du microclimat forestier, ce qui aggraverait les effets négatifs du réchauffement climatique sur la biodiversité.

Seules les plantes à fleurs et les fougères (les plantes vasculaires) sont favorisées par les forêts exploitées, où elles profitent d'un meilleur ensoleillement, grâce à l'éclaircissement régulier de la canopée, et d'un sous-sol plus souvent renouvelé. Les forêts exploitées abritent un éventail d'espèces vivantes plus réduit. La différence est surtout sensible pour les mousses, les lichens et les coléoptères se nourrissant de bois mort (les saproxylophages). Elle existe également, à un moindre degré, pour les champignons (Decocq, 2013).

Une étude réalisée au Gabon sur des trouées d'exploitation d'âges différents révèle que la régénération des essences commerciales (majoritairement héliophiles) sont butées à de difficultés de régénération pour deux facteurs notamment l'ouverture du couvert est trop petite, car la taille moyenne des trouées sont généralement comprises entre 200 et 300 m². Mais aussi la végétation concurrente est trop abondante. Ainsi, faudra t-il que la fructification coïncide avec la période de l'ouverture de la canopée et que les graines atterrisent sur un sol récemment dégagé ! Cela limite les possibilités d'installation uniquement aux périodes de fructification, qui sont très limitées dans le temps. En conséquence, les milieux les plus propices au développement de ces espèces sont ceux qui sont ouverts sur de grandes surfaces et débarrassé de la végétation concurrente, soit : les bords des routes, les champs et les savanes.

Penser au renouvellement de la politique de conservation de la forêt urbaine à l'ère du réchauffement. Dans le débat actuel sur le réchauffement de la planète, la forêt urbaine est aussi un moyen efficace de lutter contre les îlots de chaleur urbains. Elle est aussi un puits de carbone et constitue, par le fait même, une valeur d'échange dans le système des crédits de carbone. On retiendra la définition de la forêt urbaine qui indique que cette notion recouvre l'ensemble des arbres qui peuplent la ville, qu'ils soient le long des routes ou en groupes (Dubé, 2006).

1.2. Télédétection

1.2.1. Notions

La télédétection existe depuis toujours : notre outil de télédétection est l'œil... mais ce dernier est limité par 3 facteurs : son spectre (l'œil ne voit que dans le visible) ; la distance d'observation (l'œil n'est pas capable de voir une voiture à 800 km de distance) ; son angle d'ouverture. La télédétection est définie comme l'ensemble des connaissances et techniques nécessaires pour interpréter divers « objets » par leurs comportements spectraux et leurs distributions spatiales à l'aide de mesures spécifiques effectuées à distance.

Spectre électromagnétique															
Spectre électromagnétique : Radioélectricité • Spectre radiofréquence • Bandes VHF-UHF • Spectre micro-ondes															
Fréquence	9 kHz	1 GHz	300 GHz	3 THz	405 THz	480 THz	508 THz	530 THz	577 THz	612 THz	690 THz	750 THz	30 PHz	30 EHz	
Longueur d'onde	33 km	30 cm	1 mm	100 μm	745 nm	625 nm	590 nm	565 nm	520 nm	490 nm	435 nm	400 nm	10 nm	10 pm	
Bande	ondes radio		micro-ondes	térahertz	infrarouge	rouge	orange	jaune	vert	cyan	bleu	violet	ultraviolet	rayons X	rayons γ
			rayonnements pénétrants		lumière visible							rayonnements ionisants			

Fig. 2 : Spectre électromagnétique de la lumière blanche. Source : Bonnet, 2012.

- **Le spectre visible** : un rayon de lumière blanche peut être décomposé (par un prisme de cristal) et on obtient une bande de couleur allant du violet au rouge. Ces couleurs nous sont familières car elles correspondent à l'arc en ciel visible lors de la décomposition de la lumière du jour par les gouttes de pluie. Les longueurs d'ondes deviennent d'autant plus grandes que l'on progresse dans le spectre du bleu au rouge. Le spectre visible comprend les ondes de fréquence allant d'environ 400 nm à 700 nm (millionième partie du millimètre).
- **Le spectre invisible** : certaines radiations ne sont pas visibles à l'œil humain. Elles se situent à chaque extrémité du spectre : l'ultraviolet (fréquence courte) et l'infrarouge (fréquences supérieure à celle du rouge). Les émulsions chimiques ne permettent de photographier que les infrarouges très proches du rouge visible. Les images satellitales permettent d'élargir le champ d'observation en allant jusqu'aux hyperfréquences.

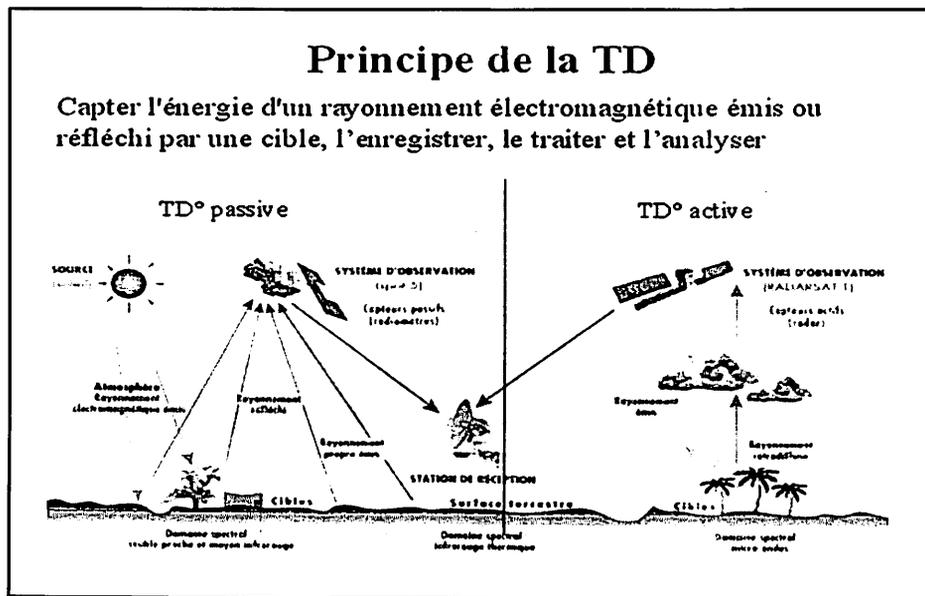


Fig. 3 : Le principe de la télédétection passive et active. Source : www.memoireonline.com

Le vecteur ou plate-forme de télédétection mesure l'énergie solaire (rayonnement électromagnétique) réfléchi par la cible. Cela peut être un satellite, un avion, un drone, un hélicoptère, un ULM, un cerf-volant. On distingue deux types de télédétection :

- active** : le vecteur émet une onde vers la cible et en mesure l'écho ;
- passive** : le vecteur ne fait que capter le rayonnement réfléchi.

1.2.2. Caractérisation de la structure d'un couvert végétal

Lorsqu'on étudie la végétation par télédétection, les variations de la réflectance mesurées au niveau du capteur satellitaire sont, non seulement liées aux propriétés optiques des feuilles, mais aussi à la structure des formations végétales. La structure d'un couvert végétal n'est pas reliée aux organes végétaux, mais concerne la plante ou le peuplement. Elle prend en compte à la fois des paramètres de structure de la canopée, comme l'indice de surface foliaire ou l'angle d'inclinaison des feuilles, et l'organisation spatiale des peuplements, leur agencement, leur densité, ainsi que le taux de recouvrement du sol selon le stade phénologique. Les propriétés optiques des feuilles sont reliées à leurs caractéristiques biochimiques (teneur en pigments, structure cellulaire, teneur en eau, état physiologique, etc. Tous les végétaux renferment des pigments : chlorophylles, carotènes et anthocyanes (pigments bleus rouges), les pigments chlorophylliens étant de loin les plus abondants.

La chlorophylle possède deux bandes d'absorption dans le bleu (450 nm) et dans le rouge (660 nm). La présence des pigments foliaires dans les végétaux est donc responsable de la forte absorption du rayonnement visible, avec un maximum relatif de réflectance autour du vert (550 nm). Lorsque la végétation est peu couvrante, la réponse spectrale des plantes est affectée par la réflectance des sols. Les interactions du rayonnement entre la végétation et le sol sont si complexes qu'il est très difficile de corriger l'influence perturbatrice du sol. Le signal mesuré par le capteur intègre généralement les réflectances du sol et de la végétation.

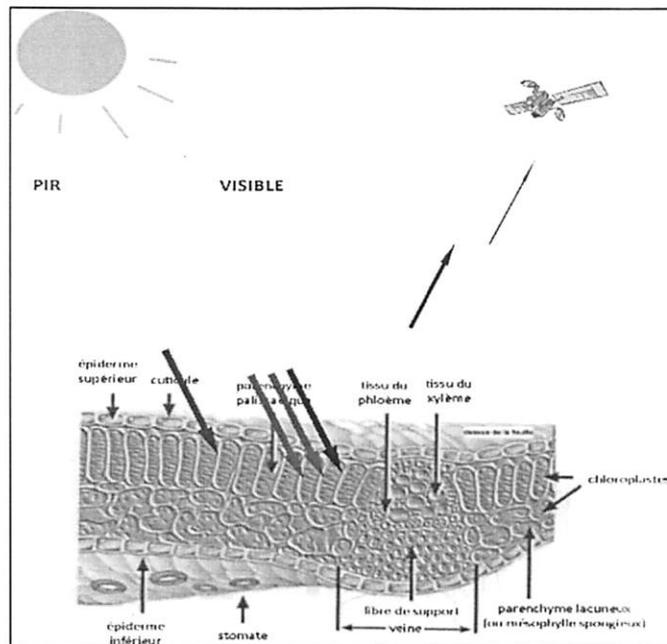


Fig. 4 : Influence de la structure cellulaire des feuilles sur leur signature spectrale.

Source : Jensen, 2000.

Les longueurs d'onde bleue et rouge sont absorbées par la chlorophylle. Les vertes sont très faiblement réfléchies par la feuille. Le rayonnement PIR, lui, est fortement réfléchi par le parenchyme lacuneux. La teneur en eau des feuilles est également un facteur qui va fortement influencer la signature spectrale de la végétation, dans les longueurs d'onde de l'infrarouge moyen. Plus la teneur en eau est forte, plus la réflectance de la végétation diminue, en particulier aux longueurs d'onde 1450 nm et 1900 nm qui correspondent aux bandes d'absorption de l'eau. Ce domaine de longueur d'onde est très utile en télédétection des couverts végétaux, il permet notamment de détecter les plantes en état de stress hydrique. Ces trois éléments (structure d'un couvert, teneur en pigments et teneur en eau) varient au cours du temps et entraînent par conséquent des changements dans la structure et les caractéristiques des couverts végétaux. Plutôt que de parler de signature spectrale, on va parler de comportement spectral de la végétation (Huete, 1989).

1.2.3. Satellite LANDSAT 8

Le satellite Landsat8 de la NASA, nouvel héritier des satellites américains d'observation de la Terre, était lancé le 11 février 2013. Il couvre la Terre tous les 16 jours avec des images de 185 km x 185 km, en 16 bits, comptant 11 bandes spectrales : 1 bande panchromatique à 15m de résolution, 8 bandes multispectrales à 30m et 2 bandes thermiques à 100m de résolution. Le satellite gravite autour de la terre en 99 minutes soit 14 fois par jour à une altitude de 705 kilomètres (438 milles) sur une orbite polaire. Il pourra ainsi cartographier l'intégralité de la planète tous les 16 jours, une collecte des données précieuse notamment concernant les forêts, les cours d'eau ou les terres agricoles. Il est prévu qu'il opère durant au moins cinq ans, mais pourrait durer le double. Les informations de Landsat permettent aussi aux pays occidentaux de gérer efficacement les ressources en eaux. Ces observations continues de notre planète permettent de mieux appréhender les modifications induites par l'exploitation des ressources naturelles ou par les changements climatiques : on peut ainsi voir par exemple à quelle vitesse fond un glacier, ou les dégâts causés par la déforestation dans certaines zones. Ce nouveau satellite transporte deux instruments de mesures plus performants que ces prédécesseurs, un appareil photo (OLI) et un capteur thermique à infrarouge (TIRS) (Robinne, 2013).

Tableau 1 : Caractéristiques des bandes spectrales de Landsat 8.

Bande	Description	Longueur d'onde (µm)	Résolution
1	aérosols	0.433–0.453	30 m
2	bleu	0.450–0.515	30 m
3	vert	0.525–0.600	30 m
4	rouge	0.630–0.680	30 m
5	proche IR	0.845–0.885	30 m
6	moyen IR	1.560–1.660	30 m
7	moyen IR	2.100–2.300	30 m
8	panchromatique	0.500–0.680	15 m
9	cirrus	1.360–1.390	30 m
10	IR thermique	10.6–11.2	100 m
11	IR thermique	11.5–12.5	100 m

1.2.4. Classification d'images

L'objectif général des classifications est de traduire des informations spectrales (bandes) en des informations d'intérêt pour les utilisateurs c'est-à-dire en classes thématiques (d'occupation du sol). La différence entre les deux grandes approches de la classification repose essentiellement sur les lignes suivantes :

1. La classification non-supervisée: l'opérateur n'est pas forcément obligé de disposer des connaissances *a priori*, les classes sont créées automatiquement par l'algorithme. A la fin du processus, les classes sont étiquetées par thème.
2. La classification supervisée: les connaissances *a priori* sont utilisées pour la création des classes par saisie d'échantillons et des zones d'entraînement. Cette approche offre certains avantages par rapport à la classification non supervisée notamment la possibilité de choisir les classes avant la classification et la facilité de tester le résultat. Les classes étant généralement définies sur des bases thématiques et une comparaison de résultat est réalisable avec des zones de test ou à partir d'une validation indépendante des zones d'entraînement.

1.2.4.1. Les classifications non supervisées

Elles sont effectuées sans prise en compte de données d'étalonnage sur le terrain. Il s'agit d'un découpage entièrement mathématique de l'espace radiométrique en un nombre de classes défini par l'utilisateur. L'algorithme le plus connu est celui des nuées dynamiques. Les classes finales n'ont pas de signification thématique. Cette technique est intéressante dans les cas où il est impossible de se rendre sur le terrain. On l'utilise aussi en préalable d'une classification supervisée. Dans ce cas-là, l'intérêt est de localiser spatialement toutes les classes qui se distinguent sur le plan de la radiométrie ce qui permet ensuite d'identifier sur le terrain chacune de ces classes. Il s'agit ici d'une aide à la construction du plan d'échantillonnage de l'enquête sur le terrain. Une autre méthode consiste à classer l'image de manière non supervisée en un nombre de classes largement supérieur à celui que l'on cherche à extraire en final. On regroupe ensuite progressivement et interactivement.

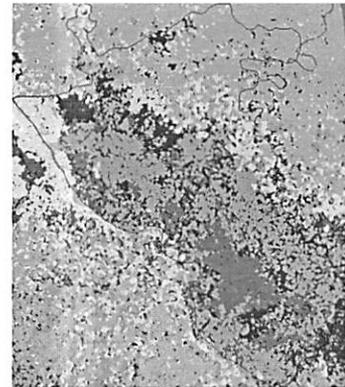
1.2.4.2. La classification supervisée

Elle se déroule en deux étapes. La première étape consiste à sélectionner des zones dont on connaît la vraie occupation du sol. Ces zones sont appelées régions d'intérêt ou Région of interest en anglais (ROI). Dans la seconde étape, ces zones sont utilisées comme références à la généralisation sur l'ensemble de l'image.



3 bandes

=>



thèmes : occupations du sol

En définitif, deux grandes méthodes (algorithmes) de classification interviennent selon le type de classification à savoir les méthodes non paramétriques et paramétriques. Les méthodes non paramétriques ne requièrent pas une hypothèse sur les distributions des classes (ex : hyperboîte, distance minimum).

Par contre, les méthodes paramétriques se fondent sur une distribution supposée connue, le plus souvent une distribution considérée comme Gaussienne/normale (ex : distance de Mahalanobis, maximum de vraisemblance). L'algorithme de classification maximum de vraisemblance est basé sur la théorie probabiliste Bayésienne. C'est la méthode la plus populaire car la plus efficace en principe si les zones d'entraînement sont grandes. Un pixel est affecté à la classe i lorsque sa probabilité d'appartenir à i est supérieure à sa probabilité d'appartenir à une autre classe.

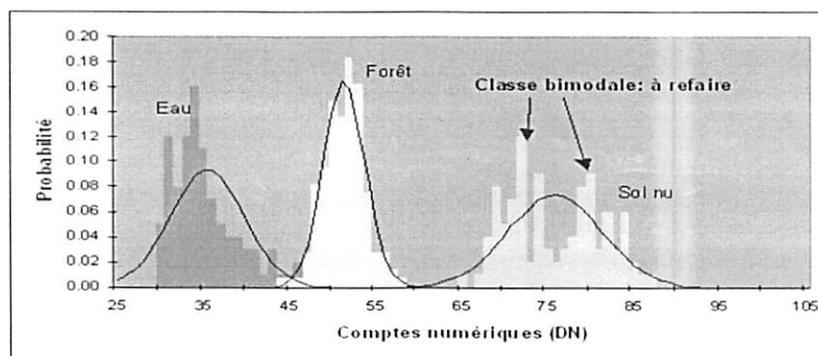


Fig. 5 : Illustration de la théorie probabiliste Bayésienne. Source : Puissant, 2006a

1.2.4.3. Evaluation d'une classification

La validation indépendante des zones d'entraînement exige l'intervention des autres informations. Celles-ci peuvent être obtenues à partir des voies ci-après :

- Les zones de test: c'est une voie facile, mais elle n'est pas totalement indépendante.
- Les autres images : elles peuvent être indépendantes, mais d'autres problèmes inhérents à la fusion de donnée (co-registration, contenu informatif différent, ...) ne rendent pas aisés les analyses.
- Les échantillons du terrain: ils sont complètement indépendants, mais ils posent souvent des problèmes d'échelle et d'échantillonnage.

1.2.4.3.1. La matrice de confusion

Elle est obtenue en comparant les données classées avec des données de référence. Concernant la présente étude, toutes les données de référence ont été prises au cours d'une seule campagne, un total de 300 waypoints comme échantillons du terrain et 100 autres waypoints ont servi dans la vérification des zones test. En croisant les données de référence (en lignes) et la classification (en colonnes), la matrice de confusion permet d'estimer la qualité de la classification à travers les paramètres suivants (Duminil, 2007) :

- la **précision globale** : C'est le rapport du nombre de pixels bien classés, (correspondant à la diagonale centrale de la matrice de confusion) sur le nombre de pixels testés.
- la **précision d'utilisateur** : pourcentage de pixels d'une classe issue de la classification correspondant à la même classe dans les données de référence. Elle fournit à l'utilisateur une mesure de la précision de chaque classe, après classification. Sa formule est : $PU_i = C_i / \sum C_i$, où : C_i : le nombre de pixels de la classe i ayant effectivement été affectés à celle-ci après classification. $\sum C_i$: la somme des pixels de la classe i dans les données de référence.
- la **précision de production** : Elle exprime le pourcentage de pixels d'une classe de référence affectés à la même classe par la classification.

Elle s'exprime de la manière suivante : $PP_i = R_i / \Sigma R_i$. Il faut préciser que :

R_i : nombre de pixels d'une classe de référence affectée à la même classe après classification

ΣR_i : le nombre de pixels appartenant effectivement à la classe i .

- **Erreur d'omission** E_{om} (erreur d'excédents) : Elle correspond au rapport sur une rangée des pixels mal classifiés sur le nombre total de pixels de la rangée. Elle représente le taux de pixels assignés incorrectement à une classe qui appartiennent en fait à une autre classe. Elle se calcule par une formule simple : $E_{om} = 100\% - P_{ui}$.

- **Erreur de commission** E_{com} (erreur de déficits) : Elle désigne le rapport sur une colonne des pixels mal classifiés sur le nombre total d'une colonne. Elle représente le taux de pixels incorrectement exclus d'une classe. $E_{com} = 100\% - P_{Pi}$.

1.2.4.3.2. Coefficient kappa

Kappa exprime la réduction proportionnelle de l'erreur obtenue par une classification, comparée à l'erreur obtenue par une classification complètement au hasard.

Kappa = -1 => la concordance est nulle

Kappa \pm 0 => la concordance est peu significative

Kappa = +1 => la concordance est très forte.

• En clair: Un Kappa de 0,75 signifie que 75% de bonnes classifications ne sont pas dus au hasard.

• Le coefficient Kappa est un estimateur de qualité qui tient compte des erreurs en lignes et en colonnes:

$$K = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c} \text{ Proportion de bonne classification}$$

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

$$\text{Proportion de bonne classification due au hasard } P_c = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^c n(., i) n(i, .)$$

$n(., i)$ sont les sommes sur la i -ème colonne et i -ème ligne respectivement, $n(i, 1)$

C : nombre de classes

$$N = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^c n(i, j) \text{ nombre de pixels}$$

CHAPITRE II: MILIEU D'ETUDE ET METHODE

2.1. Localisation géographique et description biophysique

La réserve forestière de Yoko est située dans le district de la Tshopo, dans le territoire d'Ubundu et la collectivité des Bakumu-Mangongo. Elle s'étale sur l'axe routier Kisangani-Ubundu (à gauche) aux points kilométriques 21 à 38. Elle est délimitée au nord par la ville de Kisangani et les forêts perturbées, au sud et à l'est par la rivière Biaro qui forme une demi-boucle en suivant cette direction, à l'ouest par la voie ferrée et la route le long de laquelle elle se prolonge des points kilométriques 21 à 38. , elle se situe à 0° 17' latitude N et 25° 17' longitude Est. L'altitude de la zone oscille autour de 400 m (Kahindo, 2007a).

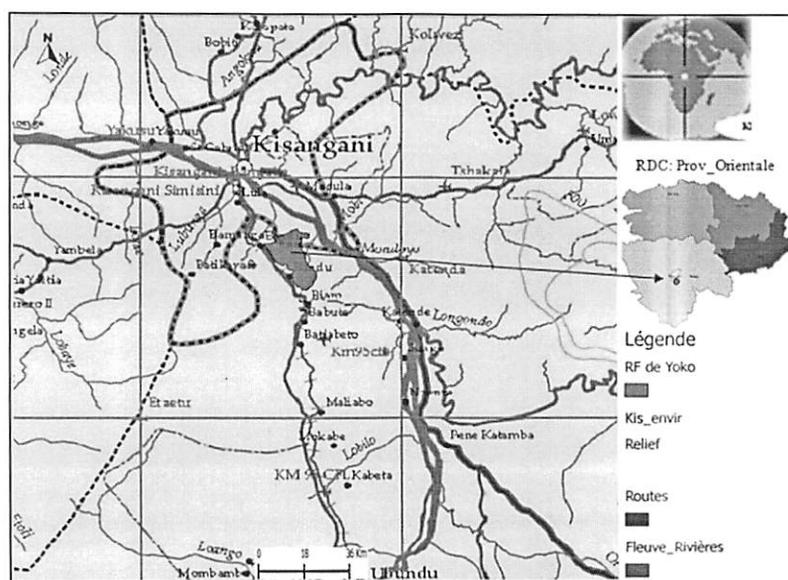


Fig. 6 : Localisation de la réserve forestière de Yoko.

2.1.1. Cadre juridique

La réserve forestière de Yoko est une propriété privée de l'Institut Congolais pour la Conservation de la Nature conformément à l'ordonnance – loi n° 75-023 de juillet 1975 portant création d'une entreprise publique de l'Etat dans le but de gérer certaines institutions publiques environnementales telle que modifiée et complétée par l'ordonnance – loi n° 78-190 du 5 mai 1988. En se basant sur l'article 12 du code forestier de 2012, elle se situe dans la catégorie des forêts classées de la RDC (Lomba, 2012a).

2.1.2. Relief et hydrographie

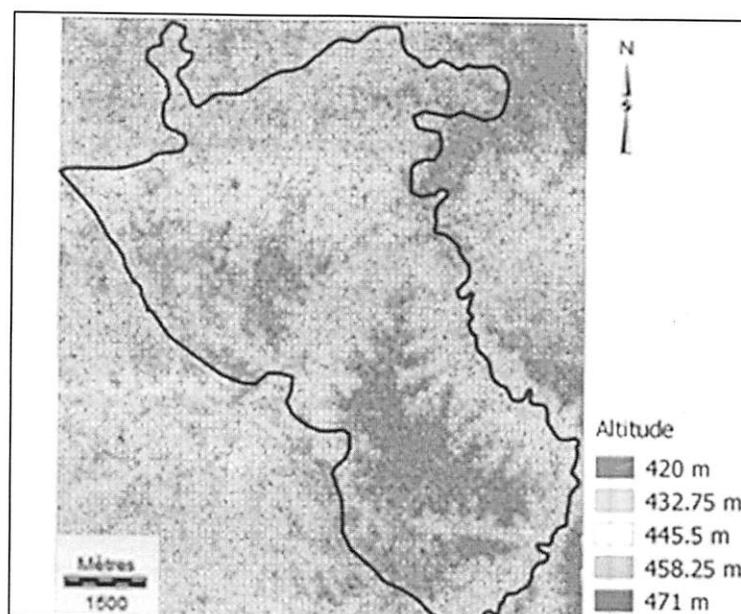


Fig. 7 : Modelé topographique de la réserve forestière de Yoko. Carte générée à partir d'une image ASTER de 30 m de résolution.

Du point de vue hydrographie, la réserve est baignée par la rivière Yoko et plusieurs ruisseaux. Elle subdivise la réserve en deux grandes parties ou blocs : un bloc nord avec 3 370 ha et un bloc sud avec 3 605 ha, soit une superficie totale de 6 975 ha (Kahindo, 2007b). Elle reçoit les eaux de nombreux affluents dont Badu I et II ; Babusoko coulant en direction Nord-Sud. Les affluents Bise, Mokonoka I, II et III, Mungamba, Ngongo et Niese déversent leurs eaux dans la rivière Yoko en direction Sud-Nord. La rivière Biaro qui délimite les deux sites au sud canalise ses eaux vers le Nord pour se joindre à Yoko avant de se jeter dans le fleuve Congo (Lomba, 2012b).

2.1.3. Climat

La réserve forestière de la Yoko étant située proche de la ville de Kisangani, nous lui attribuons les caractéristiques climatiques de cette dernière. Néanmoins, de par sa couverture végétale, elle jouirait d'un microclimat particulier. Située à proximité de l'équateur, la ville de Kisangani, et par extension la réserve forestière de Yoko, jouit d'un climat du type Af selon la classification de Köppen (Lomba, 2007a).

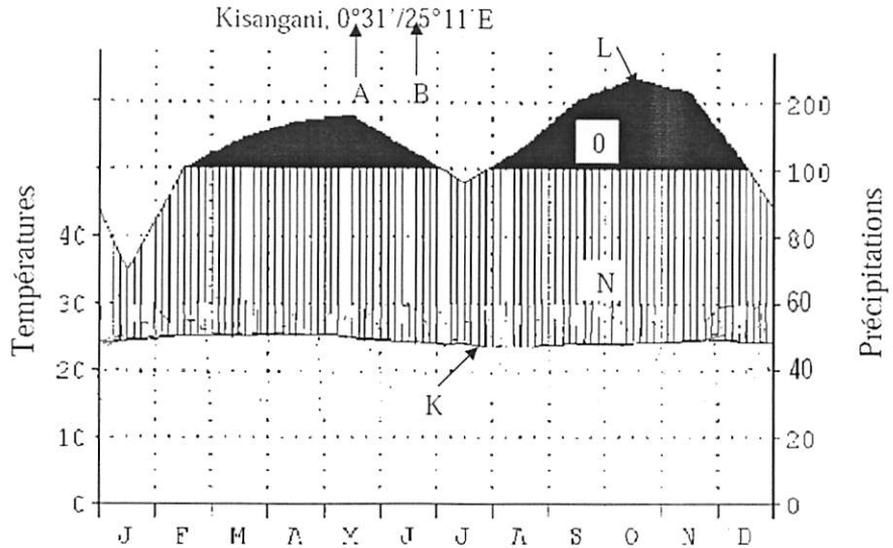


Fig. 8 : Diagramme ombrothermique de Kisangani (Nshimba, 2008).

Légende : (A) Latitude Nord, (B) Longitude Est, (D) Précipitations, (K) Courbe de températures moyennes mensuelles (une division de l'axe = 10°C), (L) Courbe de précipitations moyennes mensuelles (1 division de l'axe = 20 mm et 10°C = 20 mm), (N). Les lignes verticales correspondent à une saison relativement humide, (0) Précipitations moyennes mensuelles supérieures à 100 mm (à ce niveau, l'échelle de l'axe doit être réduite au 1/10).

Dans cette cadence, il se laisse singulariser ce qui suit : Septembre à Novembre : Période saisonnière pluvieuse. Décembre à Février : Période saisonnière relativement sèche. Mars à Mai : Période saisonnière relativement humide. Juin à Août : Période saisonnière relativement sèche 2.

2.1.4. Caractéristiques biotiques

❖ Aperçu sur la végétation

Selon que la réserve de Yoko est subdivisée en deux blocs forestiers, nord et sud, sa végétation est définie comme suit :

- Le bloc nord fait partie de groupe des forêts mésophiles sempervirentes à *Brachystegia laurentii*, à l'alliance Oxystigmo-Scorodophleion, à l'ordre des Gilbertiodendretalia dewevrei et à la classe des Strombosio-Parinarietea. Par contre, le bloc sud appartient au type des forêts mésophiles sempervirentes à *Scorodophloeus zenkeri*, à l'alliance Oxystigmo-Scorodophleion, à l'ordre des Piptadenio-Celtidetalia et à la classe des Strombosio-Parinarietea (Kahindo, 2009).

Un sujet particulier de la flore de la réserve forestière de Yoko est à titre d'exemple le *Gilbertiendendron kisantuens*. C'est une nouvelle espèce qui a été déterminée en se servant de la clé de détermination de la Flore du Congo Belge et du Rwanda-Urundi, volume III. En R.D. Congo, l'espèce a été localisée au Mayumbe ; Bas-Congo (Matadi, Kisantu). Côte d'Ivoire, Gabon. Sa présence en Province Orientale et dans le District de la Tshopo est signalée uniquement dans la réserve forestière de la Yoko (Ibanda, 2012).

❖ Aperçu sur la faune

Selon Lomba (2012c), la faune rencontrée dans la réserve forestière de la Yoko est riche, diversifiée et les noms scientifiques de quelques espèces reconnus ont été fournis par les zoologistes. On y trouve des espèces de grands et petits mammifères, de nombreux oiseaux, des reptiles, des araignées arboricoles, des lépidoptères, de nombreux insectes sont bien présents ainsi que quelques elapidae, myridae, nectaririidae, pycnonotidae. Dans la rivière Yoko et ses affluents se retrouvent des espèces de poissons appartenant aux familles de Claridae, de Cichlidae et Mormiridae.

2.1.5. Sols et topographie

La réserve forestière de Yoko a un sol présentant les mêmes caractéristiques reconnues aux sols de la Cuvette centrale Congolaise. Ce sol est rouge ocre, avec un faible rapport Silice-sesquioxyde de la fraction argileuse, une faible capacité d'échange cationique de la fraction minérale, une teneur en minéraux primaires faible, une faible activité de l'argile, une faible teneur en éléments solubles et une assez bonne stabilité des agrégats (Lomba, 2007b).

Les sols sont de types ferralitiques rouge ocre (Boyemba, 2006), ou encore appelés ferra sols (Classification de la FAO) ou encore Oxysols (Classification de l'USDA), ils sont caractérisés par leur épaisseur considérable et une coloration rouge à jaune, le pH acide (pH > 6). La topographie du terrain est généralement plate. Elle est constituée des sols de plateaux et des sols de versants. Ces derniers renferment de fortes pentes assurant l'écoulement de l'eau vers la rivière Yoko (Lomba, 2012d).

2.1.6. Importance socio-économiques

Les populations riveraines exploitent plusieurs PFNL dans la Réserve et constituent une part importante de leurs moyens d'existence et une source importante des revenus. Les PFNL contribuent au moins à 15% dans le revenu du ménage de la périphérie de Yoko.

Parmi les PFNL exploités nous pouvons citer : les Marantacées appelées "Mangungu" sont exploitées pour les toitures des cases, comme légume, pour la fabrication des nattes et comme emballage. Les chenilles appelées Mbinjo en langue locale: sont ramassées sur les arbres à chenilles de juillet à septembre. Elles exploitent d'autres PFNL d'origine animale telle que le Genre *Achatina* (Escargots, Cola) et les poissons dans la rivière qui traverse la réserve Yoko notamment : Silure (Ngonda), *Malapterirus electricus* (Mika, poisson électrique). Les produits de la pêche sont essentiellement utilisés dans l'autoconsommation.

Les plantes médicinales pour la pharmacopée traditionnelle : quelques arbres ont été cités par les enquêtés à savoir *Scorodophloeus zenkeri* contre le filaire, *Zanthoxylum gillettii* et *Petertianthus macrocarpus* les deux contre le paludisme. Les fruits sauvages : comme *Anonidium manii*. Quant au charbon de bois : certains habitants de la périphérie de la réserve de Yoko font de la carbonisation du bois pour la production du charbon. Trop peu de ménages s'adonnent à cette activité et les bois de cette activité proviennent principalement de la réserve de Yoko.

La chasse se pratique tant dans la Réserve de Yoko que dans les forêts communautaires proches et celles éloignées. La faune sauvage de la Réserve est fortement menacée par le braconnage. Les animaux sauvages les plus tués sont : Genre *Cercopithecus* (Singe, makako), Genre *Cephalophus* (Antilope), Genre *Funisciurus* (l'Ecureuil, Esende) (Masheka, 2009).

2.2. Matériel

Les images satellitales intervenues dans cette étude sont celle du satellite Landsat 8. Elles avaient servi à réaliser des analyses diverses : l'établissement des composites colorées de la région forestières dans son état relativement actualisé, la détermination des indices diverses (stress hydrique, NDVI, brillance) à partir des logiciels de télédétection. Le récepteur GPS avait facilité d'une part la collecte des points rattachés à la réalité du terrain ainsi qu'à la géolocalisation des zones d'inventaire par rapport au strates retenus.

Les randonnées au sein de la réserve forestières jusqu'à l'inspection des zones test étaient possibles grâce à l'action combinée des machettes servant à tracer des pistes et le récepteur GPS facilitant le guidage grâce à la fonctionnalité "Go to". Enfin, d'autres objets comme un stylo, un crayon, un carnet de note et un ordinateur avaient permis à la notation des caractéristiques appropriés aux zones ratissées et la sauvegarde des données.

2.2.1. Logiciels

Les logiciels utilisés dans les différentes étapes de traitement et d'analyse des données biométriques et satellitaires sont circonscrits dans le tableau ci-contre :

Tableau 3. Logiciels utilisés pour le traitement et analyses SIG.

Logiciels	Applications
ArcGIS 10.0	analyse SIG et la mise en page de la carte
ENVI 4..4	composition colorée et classification supervisée
Google Earth	photo-interprétation
IDRISIS ANDERS 15.00	les indices de la végétation
Microsoft Office Word, Power Point, Excel 2007	saisie texte, traitements des données
STATGRAPHICS Plus 5.0	analyses statistiques : ACP, AFD,...

2.2.2. Protocole de prise des données

Faute de temps et des moyens requis, les données d'inventaire confluées dans ce travail se rapportent essentiellement aux arbres dont le DHP est > 130 cm. En sus, elle prend en compte celles dont les campagnes de recolte se situent dans la fourchette allant de 2012 à 2014. L'actualisation des données de la forêt primaire était faite grâce aux résultats de la dynamique de peuplement mise en vedette par Nyembo dans le même bloc en 2012.

Selon (ONE, 2011), le recours à des données d'inventaire diachroniques aurait fait partie du processus de la quantification sommaire du carbone aérien de Madagascar en 2013. Néanmoins, ce travail se limite qu'aux données jouxte la période d'investigation.

2.2.3. Schème pour la centralisation des données d'inventaire

L'objectif fondamental de cette étude consiste à caractériser le stock de carbone aérien sur l'étendue de la réserve forestière de Yoko selon les types de statistique des résultats des classes. Sur ce, elle s'était ingéniée d'appliquer empiriquement des résultats d'études transversales ou longitudinales dont les protocoles des inventaires forestiers sont affiliés à celui de la présente étude ; en particulier les inventaires préétablis sur l'évaluation du stock de carbone aérien, la dynamique des peuplements, la phytosociologie et la répartition des groupements, et laisser libre voie à une analyse spatiale.

2.2.4. Classification supervisée et la matrice de confusion

Réaliser une classification supervisée d'une image satellite sous-entend que vous possédez une très bonne connaissance de l'occupation du sol réelle de la zone de l'image à l'époque où l'image a été prise. Cette connaissance peut provenir de plusieurs sources : enquête de terrain ou une photo-interprétation de l'image à condition d'être suffisamment sûr de votre jugement (Bobo-Dioulasso, 2010). La classification supervisée est une procédure en plusieurs étapes et itérative. Outre détermination de la composite colorée à partir des bandes 4, 5, 6 de Landsat 8, la démarche entreprise peut-être résumée par la figure ci-contre :

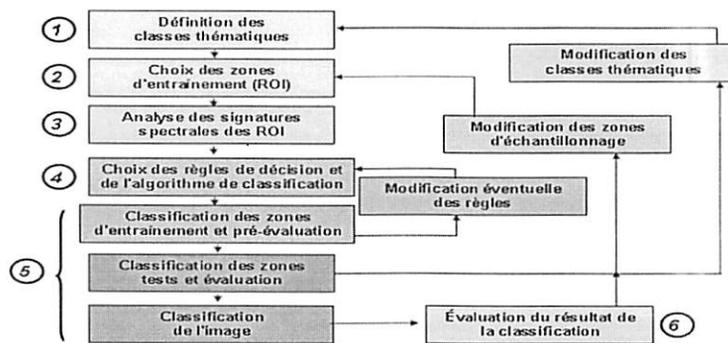


Fig. 9: Etapes de la classification supervisée. Source : Puissant, 2006b.

En l'occurrence, les deux possibilités plus hautes étaient simultanément prises en compte avant de définir les régions d'intérêt. Néanmoins, de façon lucide, elle avait précédé par une classification non supervisée dans l'intérêt de générer machinalement la mosaïque des classes thématiques. A défaut des logistiques nécessaires pour entreprendre la première campagne de récolte devant être basée sur la reconnaissance des caractéristiques inhérentes à la zone d'étude. C'est ainsi qu'en dépit de la photo-interprétation de la composite colorée, la définition des régions d'intérêt était soutenue par la carte de la CFT.

L'analyse des comportements spectraux des régions d'intérêt avait conduit à la dissolution de la classe "agriculture et sols nus" au détriment de la classe "abattis-culture" en raison des signatures spectrales assez proches pour ces derniers par rapport au premier. Eu regard, le résultat sur la mesure de séparabilité et les statistiques des régions d'intérêt, sept classes d'occupation du sol étaient retenues à savoir la forêt primaire mixte, la forêt secondaire, la forêt dégradée et jachère, la forêt à *G. dewevei*, les abattis-cultures, la surface d'eau libre et les sols nus. L'algorithme de la classification racolé aux pixels des régions d'intérêts était le Maximum Likelihood.

Les opérations post-classification affectées à l'amélioration de la classification sont notamment Color Mapping, la combinaison des classes et la filtration des classes. Landis et Koch (cités par Marechal, 2012) ont établi une échelle qualitative de classification en fonction des valeurs qui sont présentées dans le tableau imminent.

Tableau 4. Echelle qualitative définissant la précision de classification en fonction des valeurs de coefficient kappa.

Valeur de coefficient Kappa	Précision de la classification
< 0,00	Faible
0,00 - 0,20	Légère
0,21 - 0,40	Acceptable
0,41 - 0,60	Modéré
0,61 - 0,80	Bonne
0,81 - 1,00	Très bonne

Concernant la présente étude, toutes les données relatives aux réalités du terrain ont été prises au cours d'une seule campagne de récolte, un total de 300 points comme échantillons du terrain et 100 autres points dans l'inspection des zones test. Ces derniers ont facilité de prime abord à déconsidérer certaines informations de la carte des cellules d'aménagement de la CFT ; à rectifier l'étendue de la zone d'habitation, la découverte des forêts à marantacée au-delà des limites indiqués et une description plus synthétique des types forestiers en vue d'optimiser la procédure de la classification supervisée.

2.2.5. Géolocalisation des points d'inventaire sur la zone d'étude

Tableau 5. Les points d'inventaires par classes d'occupation du sol

Les classes d'occupation du sol	Sources	Superficies
Forêt primaire	Nanyonzi, 2014	0,25 ha
	DIAF, 2012	8 ha
	Modimea, 2013	1 ha
Forêt secondaire	Ibanda, 2012	3 ha
	Modimea, 2013	1 ha
	Nanyozi, 2014	0,5 ha
	Kupupula, 2012	2 ha
Forêt à <i>Gilbertiodendron dewevrei</i> monodominante et mixte	Nanyonzi, 2014	0,5 ha
	Modimea, 2013	1 ha
Forêt dégradée et jachère	Modimea, 2013	0.5 ha
	Nanyonzi, 2014	0,25 ha

Les récents inventaires forestiers étaient précédés par la cartographie de la zone d'étude. Cette étape avait permis de classer tous ces points d'inventaire suivant les classes d'occupation du sol. Mais également de superviser les activités aux différents endroits malgré les contraintes du terrain, qui malgré fastidieuses s'étaient traduites comme une aubaine, celui de collectionner les points réels à des endroits peu ou pas fréquentés par les prédécesseurs, lesquels points seront utilisés pour établir la matrice de confusion.

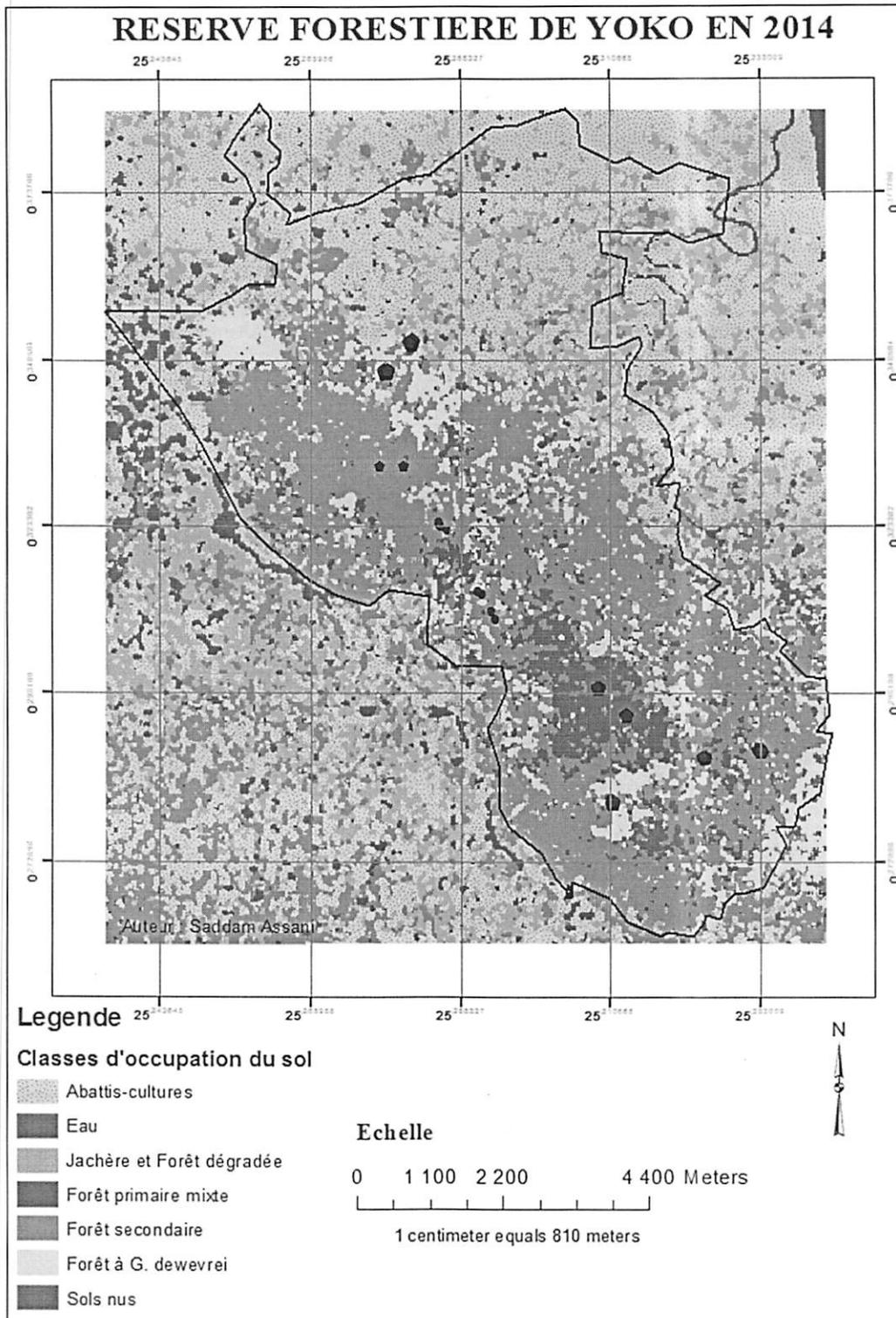


Fig. 10 : Repartition des points d'inventaire sur la zone d'étude.

2.2.6. Paramètres dendrométriques observés

a) La biomasse aérienne

La biomasse d'un arbre signifie le poids ou la masse de son tissu vivant de la plante et elle est généralement exprimée en unités de tonnes métriques (t). Une biomasse vivante peut être séparée en composantes aérienne (feuilles, branches et tiges) et en sous-sol (racines). Elle est plus fréquente pour estimer la biomasse vivante sèche (AGB) d'un arbre, qui est le poids du tissu de la plante vivante en surface, après que toute l'eau ait été enlevée, c'est à dire, après que les feuilles, les branches, et les tiges aient été soigneusement séchées, en utilisant souvent un four de laboratoire spécial. En général, l'eau représente environ 50% ou la moitié du poids (ou biomasse humide) d'un arbre vivant.

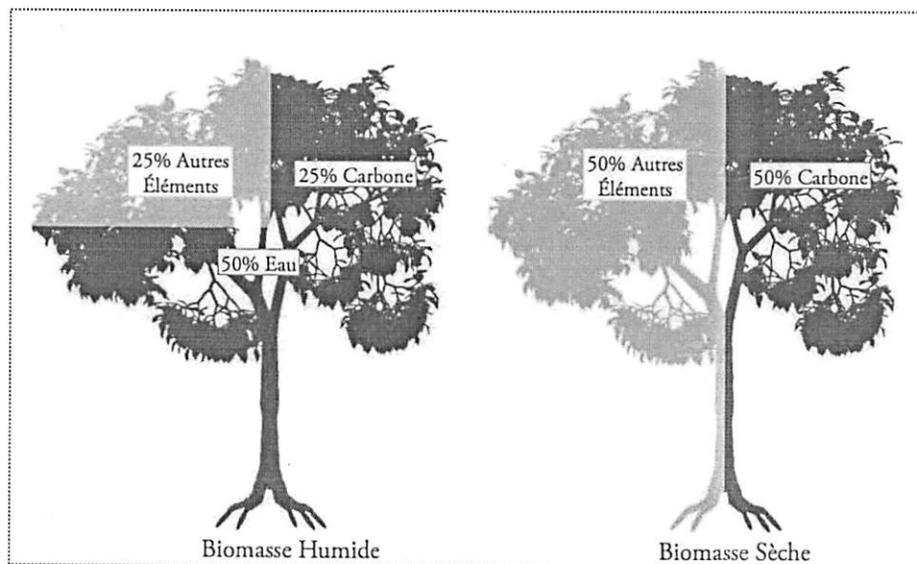


Fig. 11 : La proportion relative de carbone (C), d'Eau (H₂O), et d'autres éléments (par exemple, N, P, K, Ca, Mg, etc.) contenues dans (a) la biomasse humide et (b) sèche des arbres. Source : Walker et *al.*, 2011b.

b) Equations allométriques

Pour estimer la biomasse épigée ou aérienne (AGB) d'un peuplement forestier donné, une équation de biomasse doit d'abord être établie, il s'agit de la relation allométriques entre la biomasse de la végétation considérée et certains paramètres faciles à mesurer come le diamètre de poitrine ou la hauteur totale de la végétation (Modimea, 2013a).

Le DHB seul influence la variation de la biomasse épigée jusqu'à 95 % dans la forêt tropicale, autrement dit, il permet d'estimer avec une fiabilité la moyenne du stock de carbone aérien (Brown, 2002).

L'équation allométriques retenue dans cette étude est la suivante :

- © L'équation de Brown et *al*, 2005 qui est une mise à jour de l'équation de 1997 (Modimea, 2013b).

$$\text{Biomasse (kg)} = \exp (- 2.289 + 2.649 * \ln \text{DHP} - 0.021 * \ln \text{DHP}^2)$$

Elle intègre le paramètre DHP et le domaine de validité de ce paramètre englobe nos données d'observation (les forêts humides (1500 – 4000 mm de pluie) et un diamètre maximum de 148 cm. Pourtant, celle de Chave et *al*, 2005 intègre la densité spécifique de chaque arbres (n) qui n'est pas complète pour tous les arbres de nos forêts tropicales humides ; d'où son non utilisation dans cette étude.

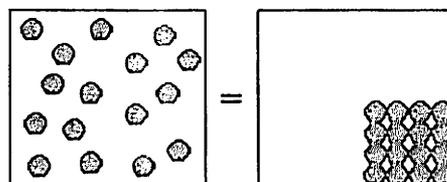
Le carbone stocké dans les plantes ligneuses (Cw) est lié à la biomasse (Bw) exprimée en tonne de matières sèches par unité de surface agraire (t/ha) et peut-être estimé par la relation : $Cw = k * Bw$ avec k égale à 0.5.

c) La surface terrière

Pour un arbre, surface de la section du tronc mesurée à 1,30 m du sol. Pour un peuplement, total des surfaces terrières des arbres. Elle correspond à la surface qu'aurait un plancher constitué de toutes les rondelles si l'ajustement ne laissait pas de vide. Elle s'exprime en m²/ha, c'est-à-dire qu'elle doit être ramenée à l'hectare pour une espèce quelconque par exemple dans un peuplement.

Elle se calcule par la formule droite ci-dessous :

$$\text{Surface terrière} = \frac{n \pi D^2}{4}$$



D = diamètre, n = nombre de troncs (nombre total de troncs par ha) et $\pi = 3,14$

d) La densité

La densité du peuplement est le nombre de tiges sur pied ramené à l'hectare (notation : N). Pour une espèce quelconque, c'est le nombre de pieds appartenant à cette espèce à l'hectare. Par contre, la densité relative est le nombre de pieds d'une espèce (ou famille), pondéré au nombre de pieds total.

$$\text{Densité relative (\%)} = \frac{\text{Nombre d'individus d'une espèce ou d'une famille}}{\text{Nombre total d'individus dans l'échantillon}} \times 100$$

2.2.7. L'indice de végétation par différence normalisé (NDVI) ou l'indice de Tucker

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{PIR}} - \rho_{\text{R}}}{\rho_{\text{PIR}} + \rho_{\text{R}}}$$

Où

ρ_{PIR} : réflectance dans la bande infrarouge

ρ_{R} : réflectance dans la bande rouge

Les valeurs du NDVI sont comprises en théorie entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages, pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7 - les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses (Ronald, 2006).

2.2.8. Les analyses statistiques

Les analyses statistiques utilisées pour traiter nos données étaient de deux groupes :

- L'Analyse en Composantes Principales (ACP) ou PCA (Principal Component Analysis)

La voie la plus aisée d'expliquer l'analyse en composantes principales est purement géométrique. L'ACP repose sur le calcul de coefficients de corrélation entre des variables, qui sont descriptives d'objets dont on souhaite synthétiser les interrelations.

- L'Analyse Factorielle Discriminante

Elle a permis de déceler les différences entre les traitements à partir des fonctions discriminantes. En l'occurrence, il était question de comparer les classes d'occupation du sol dont la forêt primaire mixte, la forêt secondaire, la forêt à *G. dewevrei* et la jachère et forêt dégradée. La visée était de s'assurer que ces traitements représenteraient pour autant des classes dans les statistiques spatiales (ex : la géostatistique) où l'utilisation des cofacteurs peuvent intervenir pour expliquer la variabilité spatiale.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Cartographie par télédétection de la réserve forestière de Yoko

3.1.1. Comportements spectraux des régions d'intérêt

La reconnaissance des régions d'intérêt plausibles était faite sur base de la carte des cellules d'aménagement de la CFT, des zones ayant fait précédemment objet des inventaires forestiers ainsi que de la photo-interprétation de la composite colorée. Ci-dessous les résultats des signatures spectrales respectives ayant permis d'affiner la classification supervisée.

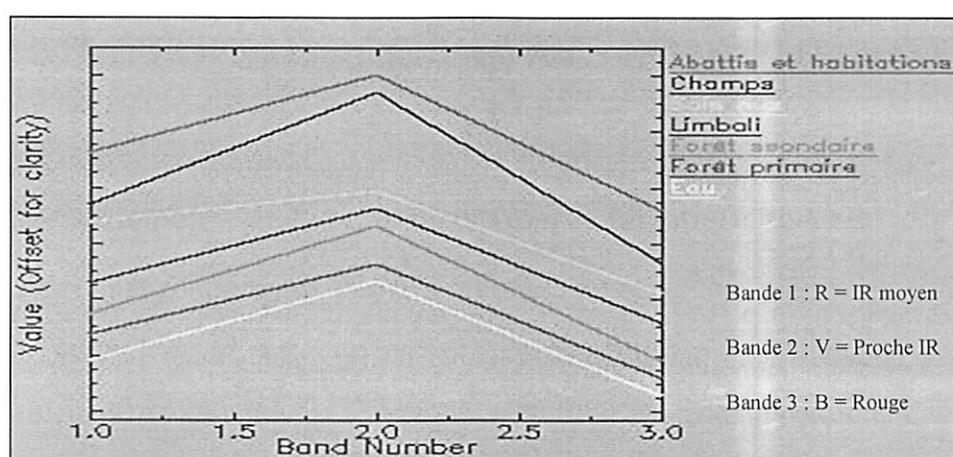


Fig. 12 : Comportements spectraux des régions d'intérêt.

En guise sept classes d'occupation du sol étaient finalement retenus, grâce à des validations du terrain dans notre zone d'étude entre autres la forêt dense primaire, la forêt secondaire, la forêt dégradée et la jachère, abattis-cultures, La forêt à *G. dewevrei*, les sols nus, la surface d'eau et de les cartographier par le biais d'une classification supervisée.

Tableau 6. Mesure de séparabilité des classes d'occupation du sol.

Forêt primaire		Forêt secondaire	
Forêt secondaire	1.75809531 1.87257298	Forêt primaire	1.75809531 1.87257298
Forêt à <i>G. dewevrei</i>	1.46951707 1.63070927	Forêt à <i>G. dewevrei</i>	1.91128055 1.98621696
Eau	1.98704561 2.00000000	Eau	1.99781991 1.99999998
Abattis-cultures	1.99140419 1.99982961	Champs et abattis	1.60574108 1.97734968
Sols nus	2.00000000 2.00000000	Sols nus	2.00000000 2.00000000
Forêt dégradée/jachère	1.79652387 1.91404323	Forêt dégradée/jachère	0.87907722 1.16991870

Forêt à <i>G. dewevrei</i>		Eau	
Forêt primaire	1.46951707 1.63070927	Forêt primaire	1.98704561 2.00000000
Forêt secondaire	1.91128055 1.98621696	Forêt secondaire	1.99781991 1.99999998
Eau	1.95893973 1.99998754	Forêt à <i>G. dewevrei</i>	1.95893973 1.99998754
Champs et abattis	1.99825337 1.99999993	Champs et abattis	1.99980767 2.00000000
Sols nus	2.00000000 2.00000000	Sols nus	2.00000000 2.00000000
Forêt dégradée/jachère	1.75485056 1.99327352	Forêt dégradée/jachère	1.98635490 1.99999998
Champs et abattis		Sols nus	
Forêt primaire	1.99140419 1.99982961	Forêt primaire	2.00000000 2.00000000
Forêt secondaire	1.60574108 1.97734968	Forêt secondaire	2.00000000 2.00000000
Limballi	1.99825337 1.99999993	Limballi	2.00000000 2.00000000
Eau	1.99980767 2.00000000	Eau	2.00000000 2.00000000
Sols nus	1.93841034 1.99995099	Champs et abattis	1.93841034 1.99995099
Forêt dégradée/jachère	0.99486318 1.19448266	Forêt dégradée/jachère	1.99998844 2.00000000

Il ressort de ce tableau, une bonne séparabilité entre les pixels des 14 couples des classes sur un total de 21 couples, s'il faudrait faire un comptage sans répétitions en nature de telle sorte que tout couple $(x, y) = (y, x)$. Les sols nus et l'eau sont bien distincts réciproquement ainsi qu'avec le reste des classes. C'est aussi le cas entre la forêt secondaire par rapport à la forêt de *Gilbertiendendron dewevrei* monodominante et mixte. Par ailleurs, cinq couples présentent une faible séparabilité notamment la forêt primaire par rapport à la forêt secondaire et la forêt à *Gilbertiendendron dewevrei*.

Cependant, la mesure de la séparabilité entre la forêt dégradée et jachère, la forêt secondaire et abattis-cultures, laisse entrevoir une confusion entre ces classes. Nous attribuons ces faibles séparabilités d'une part à la fragmentation de la zone d'étude (forêt primaire mixte, la forêt à marantacée, les jachères d'âges différentes, etc.) et au choix entre de bonnes séparabilités et la réalité du terrain. Les comportements spectraux des canopées n'étant toujours pas le critère exclusif dans la démarcation les types forestiers qui, par moment, peuvent avoir des comportements spectraux voisins.

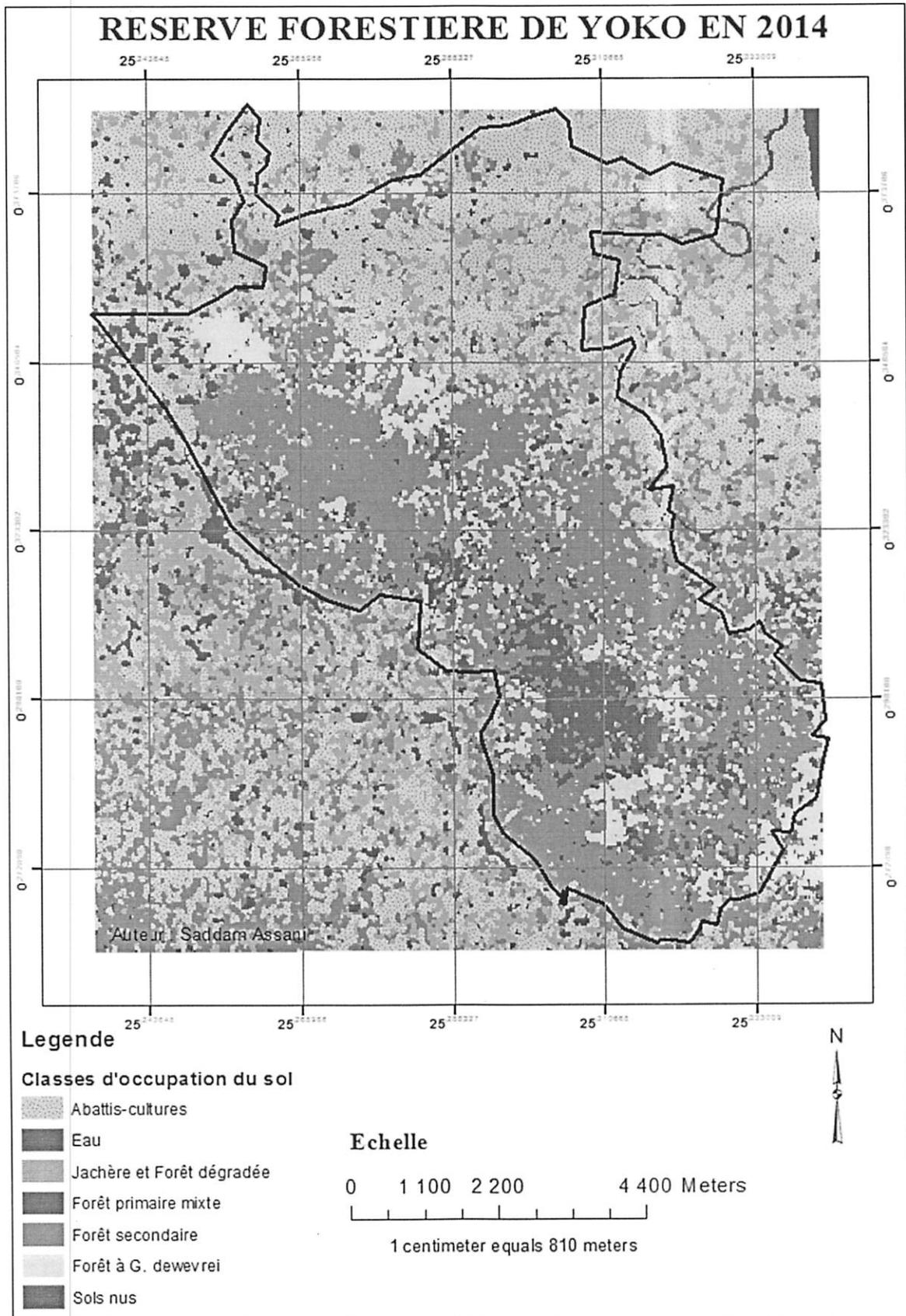


Fig. 13 : Stratification de la région forestière de Yoko.

3.3.2. Validation des classes d'occupation du sol

Les classes d'occupations du sol de la réserve forestière de Yoko feront l'objet d'une évaluation par trois moyens à savoir le calcul de l'indice de Tucker (NDVI), la matrice de confusion et la photo-interprétation.

3.3.2.1. L'indice de végétation par différence normalisé ou l'indice de Tucker (NDVI)

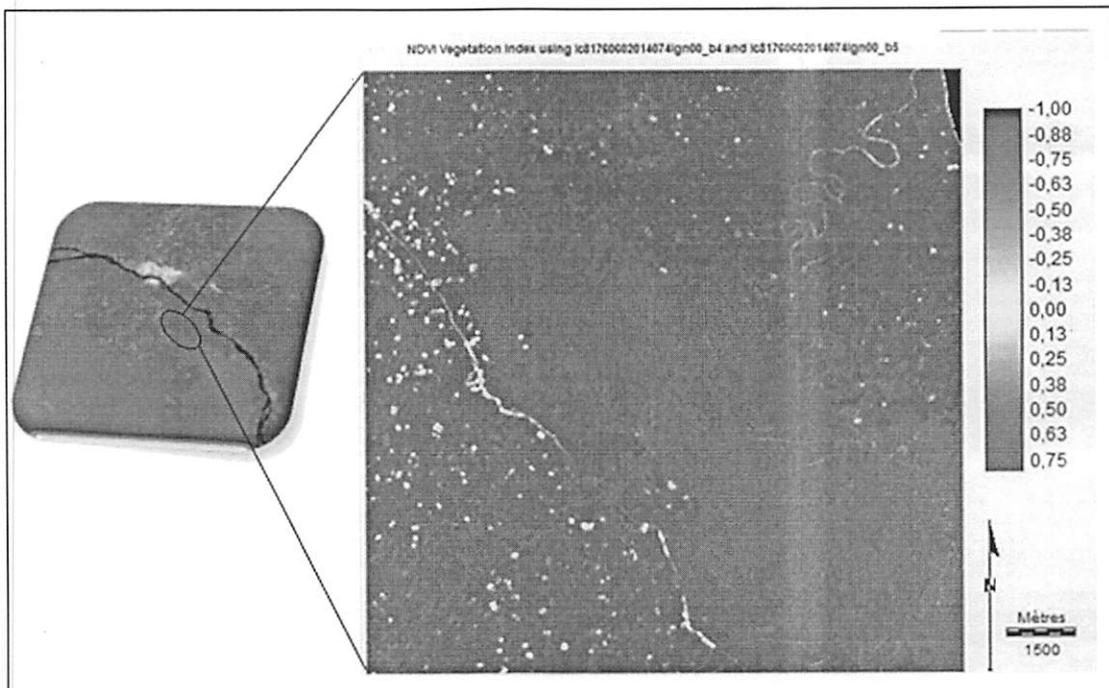


Fig. 14 : Différentes valeurs de NDVI dans la région forestière de Yoko.

Ces valeurs laissent conjecturer la présence des sols dénudés sur l'aile septentrionale de la réserve forestière de Yoko. Mais aussi la présence des surfaces d'eau et des surfaces végétalisées. Concernant les forêts, l'analyse spectrale se base avant tout sur les canopées des arbres. Voilà pourquoi, il a été impraticable d'intégrer la classe des forêts avec sous bois à marantacées lors de la classification supervisée. Nos descentes sur le milieu d'étude réalisées du 22 au 26 Mai 2014, nous accordes la possibilité de certifier que les points jaunes au sein de la réserve forestière de Yoko sont sols nus à défaut des campements occupés par les indigènes pratiquant essentiellement le système de culture sur abattis-brûlis.

Par ailleurs, les résultats de la classification supervisée de la ville de Kisangani obtenus par Ilunga (2012), corrobore avec cette observation en signalant la présence de jachère-culture et friche-sol nu, à la périphérie de la zone urbaine voire jusqu'aux abords de la réserve forestière de Yoko. Néanmoins, quelques confusions se sont glissées durant la classification. Nous pouvons citer à titre d'illustration :

- 41,24 % de la forêt primaire confondue à la forêt secondaire ;
- 44,23% de la forêt dégradée et jachère confondue à la classe abattis-cultures
- 16,24 % de forêt à *Gilbertoondendron dewevrei* confondue à la surface d'eau

3.3.2.2. L'évaluation de la précision de la classification supervisée de la R.F. de Yoko

Elle est mise en exergue dans le tableau de la matrice de confusion. Le diagonale affiche le pourcentage de pixels bien classés et hors diagonale le pourcentage de pixels mal classés. La précision globale des classes d'occupation du sol de 2014 est de **66,04%**. Cette valeur de l'indice Kappa de 55.95 % permet de valoir comme qualificatif "classification modérée" à la carte stratifiée de la R.F. de Yoko. Sa valeur veut signifier que la classification évite 55.95% des erreurs à même de corrompre les résultats d'une procédure travaillant complètement au hasard.

Tableau 7. Matrice de confusion des classes d'occupation du sol de la R.F. de Yoko

Classification		Réalités terrain							TOTAL
		FP	FS	FDJ	L	AC	Eau	SN	
	Forêt primaire	37,2	0,58	0,61	6,28	0,08	1,52	0	5,93
	Forêt secondaire	41,24	91,31	3,22	19,97	2,92	0,91	0,13	30,68
	Forêt dégradée et jachère	14,62	6,31	38,92	12,52	21,37	3,76	0,29	17,9
	Limballi	6,23	0,78	1,92	60,69	0,92	16,24	0	9,18
	Abattis-cultures	0,39	0,98	44,23	0,4	71,04	0,81	1,72	31,77
	Eau	0,03	0	0,37	0,04	0,25	76,14	0,13	0,55
	Sols nus	0,29	0,03	10,74	0,1	3,41	0,61	97,73	4
	TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100
Précision globale (%)									66,0444
Kappa (%)									55,95

La fragmentation de la réserve forestière de Yoko était malgré tout une difficulté dans la définition des classes d'occupation et la discordance dans le comportement spectral typique à celui de la forêt secondaire au côté sud et celui de l'envers du décor telle qu'observée sur la composite colorée au côté nord, en raison de la succession de la forêt secondaire par la forêt primaire sous cette canalisation insidieuse des canopées ouvertes au nord. Enfin, le contraste entre les comportements spectraux est plus au moins faible entre ces deux types forestiers, et il est encore faible entre la forêt secondaire par rapport à la forêt à sous bois de marantacée.

Quant à la seconde confusion majeure, elle peut-être imputée à la présence des îlots forestiers ne permettant pas une démarcation impeccable avec les zones de culture. Quant à la forêt à *G. dewevrei* monodominante et mixte par rapport à la surface d'eau, la variation de la largeur des cours d'eau sèmerait des éventuelles confusions. En effet, lorsque largeur des lits des cours d'eau n'est pas relativement assez distendue pour ne pas être camoufler par les canopées au long des berges, des confusions éventuelles pourraient se glisser dans certaines portions.

3.3.2.3. La photo-interprétation

Il convient de différencier sur l'image (a) quelques points de calage comme les localités, la voie ferroviaire, les rivières, la route, la limite du bloc permanent de REAFOR et des points portant des informations intrinsèques de l'envers du décor. L'image (b) est une présentation de la région forestière de Yoko en trois dimensions à partir d'une image ASTER de 30 m de résolution. La classe de la forêt à *G. dewevrei* y est symbolisée par la couleur jaune et celle de l'eau par la couleur bleue. Les images (d, e) montrent les abattis-cultures.

Gilbertiodendron dewevrei est une essence de terre ferme, mais aussi rupicole ou de forêt marécageuse, à tempérament grégaire, pouvant former des peuplements presque purs. L'aire de distribution de *Gilbertiodendron dewevrei* s'étend du Liberia à l'Angola et au Congo. C'est une essence éminemment sociale, très commune par endroit surtout dans les sols sablonneux de la partie orientale de la Cuvette Centrale (Musepena, 2009a).

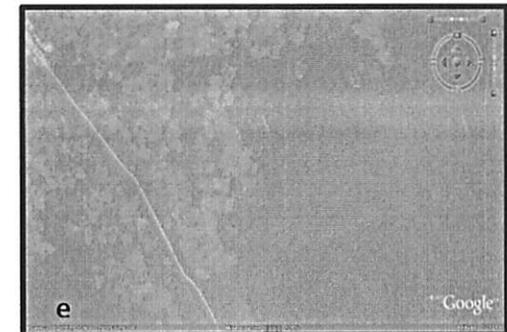
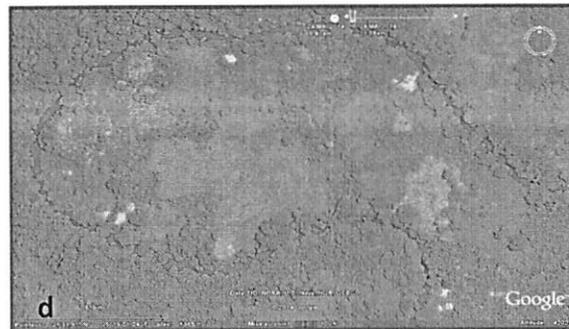
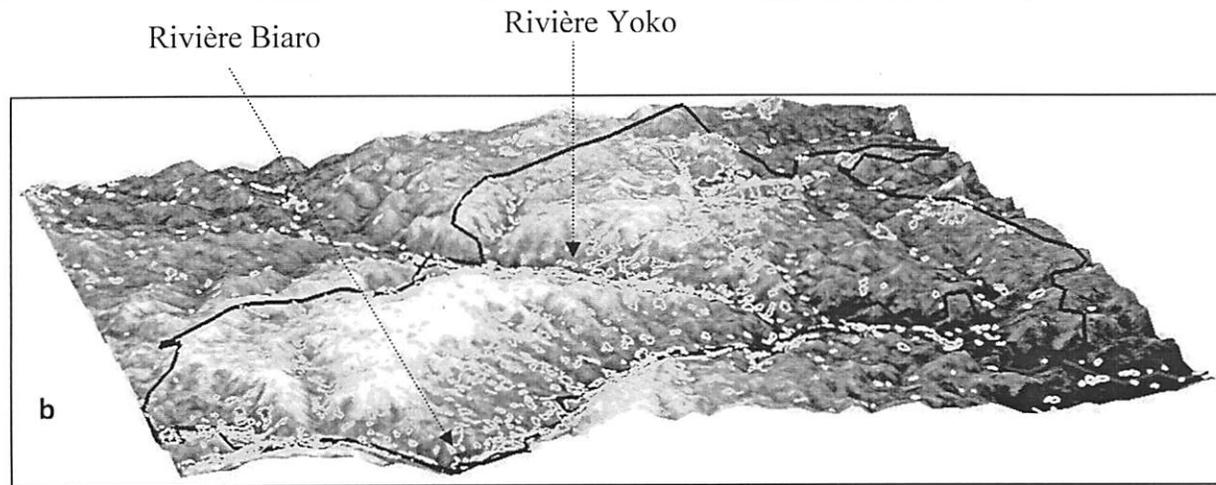
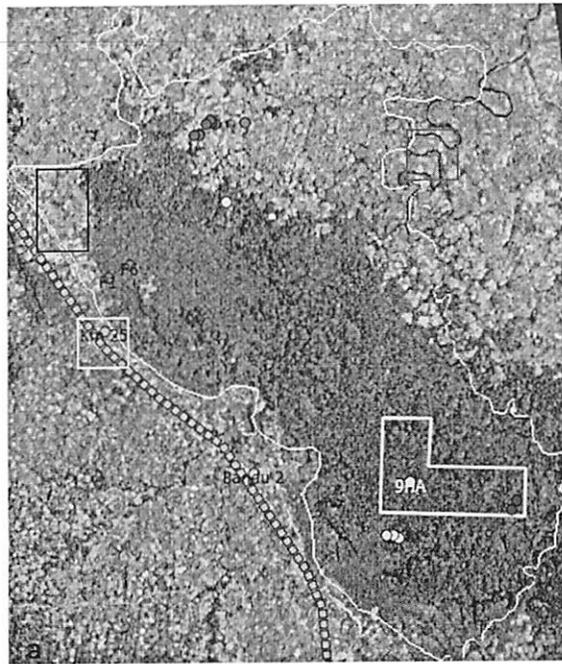


Fig. 15 : Identification des caractéristiques d'utilisation et occupation du sol dans la région forestière de Yoko.

L'image (b) démontre que la généralisation du comportement spectral de la région d'intérêt à *G. dewevrei* va jusqu'à chevaucher les berges des cours d'eau tortueux de Biaro et Yoko, ce qui ne semble pas contredire la fameuse écologie de cette espèce, peu s'en faut qu'elle se retrouve dans un peuplement mixte.

D'après Batsielili (2008), la végétation de la zone de 400 ha est essentiellement constituée de deux ensembles : un ensemble regroupant les forêts à *Caesalpinaceae*, comprenant des forêts à *G. dewevrei* qui forme un peuplement plus ou moins pur ; et un autre ensemble des forêts à *Scorodophloeus zenkeri* également constitué d'essences héliophiles ou semi héliophiles issues probablement de l'anthropisation de la zone.

Selon Bandjoko (2009), Le bloc sud de la Reserve de Yoko a une topographie accidentée et comporte beaucoup des trouées et des espaces occupées par les forêts à *Marantaceae*. Les points GPS en rouges dans le bloc (a) ressortent l'emplacement de la forêt à marantacée dans le bloc. Les signatures spectrales de la forêt secondaire et de la forêt à sous bois à marantacée étant très proche, la généralisation de la région d'intérêt de la forêt secondaire laisse nébuleux les démarcations.

Quant à la mosaïque du côté longitudinale qui s'étend en dehors du bloc de 400 ha pour se manifester de nouveau aux abords de la localité Pk25. C'est une plantation mixte constituée des arbres de la forêt primaire comme le *Pericopsis elata*, le *G. dewewrei*,...

Kearsly (2012) avait évalué dans le bloc permanent de 400 ha l'indice de la surface foliaire, l'indice de répartition angulaire des feuilles et l'ouverture de la canopée. Particulièrement, la valeur moyenne de l'indice de la surface foliaire (LAI) déterminé par la méthode de la photographie hémisphérique, se retrouve proche de la moyenne de 4.8 ± 1.7 indiquée par Scurlock (2001) pour une forêt tropicale sempervirente. On estime que pour un couvert végétal avec un LAI supérieur à 5, toute possibilité d'éclairement incident direct du sol sous-jacent est écarté, quelle que soit la géométrie d'éclairement (Slater, 1980). C'est ce qui s'accorde avec les valeurs de l'indice de Tucker qui se révèlent plutôt plus élevées dans la forêt primaire que dans les autres types forestiers.

3.3.4. Caractéristiques des paramètres quantitatifs des classes d'occupation du sol

Il sera présenté à ce niveau la variabilité exprimée par les individus de différentes espèces indépendamment de leurs classes respectives par rapport aux paramètres : densité relative, la surface terrière et le stock de carbone. Il s'ensuivra les résultats de l'Analyse Factorielle Discriminante inter classes.

3.3.4.1. L'Analyse en Composantes Principales

Tableau 8. Contribution des composantes principales sur la variabilité totale et corrélation entre les composantes et les variables analysées.

Composantes principales	CI	CII
Valeurs propres	2,65118	0,342534
Variance relative en pourcentage	88,373	11,418
Variance cumulée en pourcentage	88,373	99,791
Stock de carbone	0,59416	0,422418
Densité relative	0,534094	-0,843506
Surface terrière	0,60143	0,331755

Cette phase permet de sélectionner le nombre d'axe factoriels que l'on souhaite conserver. Sur base du critère de Kaiser, les composantes principales I et II étaient retenus en vue d'élucider la distribution spatiale des variables originelles sur la fig. 1. Car, elles expliquent à eux seuls 99.791 % de l'inertie totale de nuage de points.

La première composante CI avec 88,37 % est principalement et positivement caractérisée par les variables le stock de carbone et la surface terrière des sujets d'espèces différentes indépendamment de leurs classes d'occupation du sol afférentes. Et cela sur base des valeurs des coefficients de corrélation respectifs de 0,59 et 0,60 % lui attribuant ainsi une signification dendrométrique. Par contre, la composante CII est caractérisé négativement par la variable densité relative des espèces ligneuses constituant l'échantillonnage.

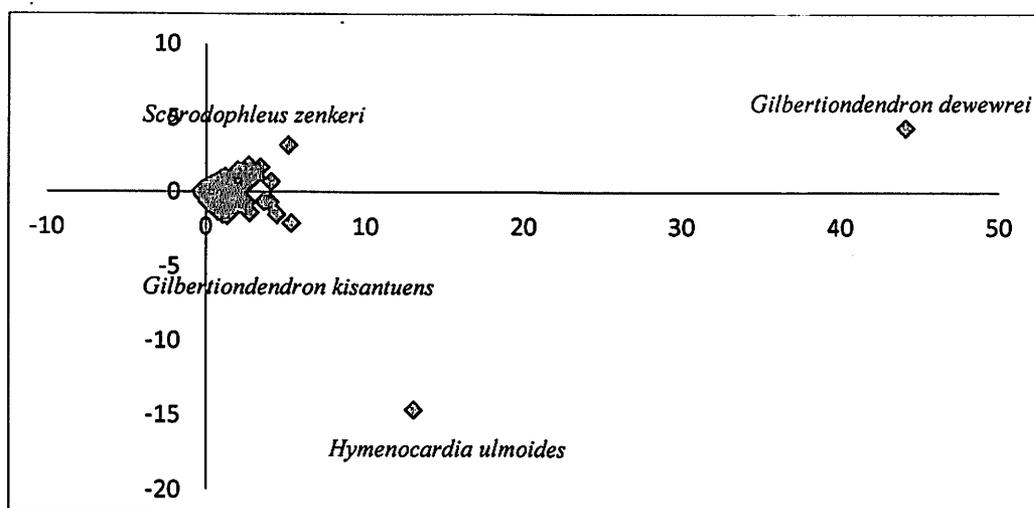


Fig. 16 : Distribution spatiale des individus au long des composantes principales I et II.

Il se laisse remarquer que la majorité des espèces ligneuses ont un comportement similaire par rapport aux variables surface terrière, le stock de carbone et la densité relative. Ce qui laisse entrevoir un caractère mixte et progressif de l'évolution de la forêt. Ces résultats commencent avec les structures des populations des classes d'occupation du sol dénotant une régénération constante dans le temps et la classification des classes d'occupation du sol en fonction des variables indiquant une similarité au seuil de 56.84 % (annexe 1 et 2).

Néanmoins, deux espèces ligneuses à savoir le *Gilbertiendendron dewewrei* et l'*Hymenocardia ulmoides* se sont distinguées respectivement dans le stock de carbone en plus la surface terrière pour une contribution positive et la densité relative pour une contribution négative dans l'échantillonnage. Les espèces ligneuses manifestant un comportement particulier par rapport à la tendance générale et de la mosaïque intermédiaire sont le *Gilbertiendendron Kisantuens* et le *Scorodophoeus zenkeri*. Par contre, *Hymenocardia ulmoides* malgré sa prépondérance dans l'échantillonnage n'a pas une contribution compétitive à celle de *G. dewewrei* en termes de carbone stocké.

Signalons que Gillet (2013a), avait trouvé au sein de la mosaïque forestière au nord de la République du Congo des structures des populations de *G. dewewrei* sur terre ferme et périodiquement à l'allure d'une exponentielle décroissante. La forêt périodiquement inondée comprenait une plus forte proportion de jeunes tiges de *G. dewewrei* (dhp de 5 à 19.9 cm). Inversement, les gros diamètres étaient mieux représentés sur terre ferme.

Cette observation corrobore aussi avec celle de (Musepena, 2009b) le long de la rivière Yoko. Cependant, *Hymenocardia ulmoides* reste représentée dans les petites classes de diamètre.

3.3.3.4. L'Analyse Factorielle Discriminante

Tableau 9 : Résultat de l'Analyse Factorielle Discriminante pour les variables quantitatives des classes d'occupation du sol.

Fonctions discriminantes	Valeur propre	Fréquence relative	Lambda de Wilks	χ	Signification (p)
Y ₁	0,114723	79,41	0,871147	127,53	0,0000***
Y ₂	0,0289199	20,02	0,971087	27,1237	0,0000***

Les fonctions Y₁ et Y₂ peuvent être utilisées pour différencier ces classes constituées par des individus de différentes espèces en interaction avec l'environnement et entre eux. C'est le résultat de L'analyse Factorielle Discriminante repris dans le tableau ci-haut, pour avoir atteint des valeurs propres significatives avec une probabilité inférieure au seuil de 0.001 (très hautement significative).

L'analyse de corrélation démontre que la fonction Y₁ discrimine principalement les classes pour les variables suivantes : densité relative, la surface terrière et le stock de carbone, faisant d'elle la plus importante au regard de son poids relatif dans la différenciation totale avec 79.41 %. En conséquence de quoi, notre première hypothèse vient d'être acceptée. Car, les classes d'occupation du sol retenues ne peuvent pas être considérées comme des unités homogènes dans la caractérisation du stock de carbone aérien de la zone d'étude.

Tableau 10 : Corrélation entre les fonctions discriminantes et les variables originelles.

Variables originelles	Fonctions discriminantes	
	Y ₁	Y ₂
Stock de carbone (t/ha)	1,27949	6,73544
Densité relative	1,23003	0,146756
surface terrière (m ² /ha)	0,821726	-6,20068

Les plus faibles corrélations pour les fonctions discriminantes Y₁ et Y₂ s'observent respectivement pour les variables surface terrière et la densité relative. Il convient de signifier que les deux fonctions discriminantes Y₁ et Y₂ contribuent significativement à la différenciation totale des strates avec 99.43 %. C'est ainsi que la distribution spatiale des strates au long du plan formé par les deux fonctions discriminantes et la position relative des variables originelles, exprimée par les corrélations positive et négatives entre les variables originelles et lesdites fonctions, ont permis d'élucider leur vacillation en vue de caractériser la contribution de chaque strate sur le carbone stocké.

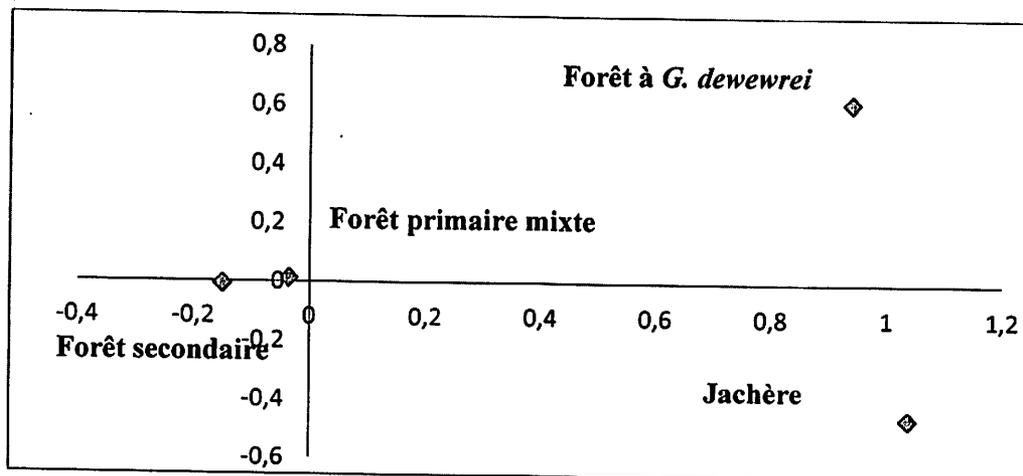


Fig. 17 : Distribution spatiale des classes au regard des variables originelles.

La forêt de *G. dewevrei* est meilleure en stock de carbone comparativement aux autres types forestiers. Le stock de carbone entre la forêt primaire et la forêt secondaire reste moins contrastée, mais situant la forêt primaire supérieure à la forêt secondaire. Enfin, la jachère se situe en dernière position.

Cette observation est similaire de façon ordinale à celle de (Makana, 2010) qui révèle que les forêts monodominantes en Ituri, dominées par *G. dewevrei*, sont particulièrement riches en carbone par rapport à la forêt primaire mixte et à la forêt secondaire. Elle est aussi partagée par les résultats de (Moonen et Muys, 2014), dans les forêts anciennes situées dans trois sites d'étude en district de Tshopo situant la forêt à *G. dewevrei* supérieure aux forêts mixtes.

Il se laisse remarquer que la diversité ligneuse n'a pas occasionné un stock de carbone discriminatoire entre la forêt mixte et la forêt primaire à dominance de *G. dewevrei*. En l'occurrence, la contribution spécifique s'avère patente sur le stock de carbone aérien (*G. dewevrei*, *Scorodophloeus zenkeri* et *Gilbertiondendron kisanuensis*). C'est ce qui permet d'affirmer notre première hypothèse.

Tableau 11 : Moyennes des variables en fonction des classes.

Classes d'occupation du sol		Forêt secondaire	Forêt à <i>G. dewevrei</i>	Forêt primaire	Jachère et F. dégradée
Moyennes	Stock de carbone	217,82	397,47	221,75	141,32
	Densité	444	364	420	461
	Surface terrière	32,18	44,41	31,25	33,22

Comparativement aux stocks de carbone de 270,8 t/ha et 187 t/ha dans la forêt à *G. dewevrei* en Ituri et dans celle précitée pour le district de la Tshopo, le stock de carbone dans la même forêt à la réserve forestière de Yoko est formellement plus élevé avec 397,47 t/ha. Ces différences significatives peuvent s'expliquer par les paramètres structuraux qui semblent fluctuer d'une zone à une autre.

Ce point de vue rejoint celui de Gillet (2013b), qui avait trouvé une surface terrière de 15 et 18 m²/ha (dhp \geq 10 cm) inférieure par rapport à celle de région d'Ouessou pour un dhp \geq 60 cm. Par ailleurs, Ebuy (2009a) avait estimé un stock de 229,3 t/ha dans une plantation de *G. dewevrei* âgée de 70 ans ne comportant aucun arbre d'un dhp $>$ 60 cm. Nonobstant, nos données d'inventaire pour ce type forêt renseigne que le *G. dewevrei* dans la fourchette de 60 cm et 153.8 cm de dhp représente 24,24 % de l'effectif total.

Ce faisant, remarquons que ce fameux stock de carbone plus élevé de *G. dewevrei* par rapport aux forêts mixtes n'est pas forcément signe d'un potentiel de séquestration meilleure de la première par rapport à ces dernières. En effet, le stock de carbone moins élevé en forêt primaire mixte s'expliquerait par la structure de sa population probable empreinte des perturbations antérieures. Nyembo (2012), dans son étude sur la dynamique de peuplement dans le dispositif permanent de 9 ha dénote un accroissement diamétrique 0,2474 cm/an et 0,15896 cm/an respectivement pour les espèces dominantes et dominées. Ces valeurs sont nettement inférieures à celle mise en vedette par Ebuy (2009b) de 0.6 cm dans la plantation de *G. dewevrei* de Yangambi, mais Makana (2010c) trouve une accumulation plus élevée de carbone de 3.32 t/ha/an en forêt primaire mixte contre 2.89 t/ha/an en forêt à *G. dewevrei*.

Par ailleurs, Tshibamba (2010), explique que la différence entre les valeurs d'antracomasses de la forêt primaire à dominance de *G. dewevrei* et celle à dominance de *Scorodophoeus zenkerie* à la réserve forestière de Yoko résulterait du fait que cette dernière aurait connue des feux plus intenses pendant les époques récentes.

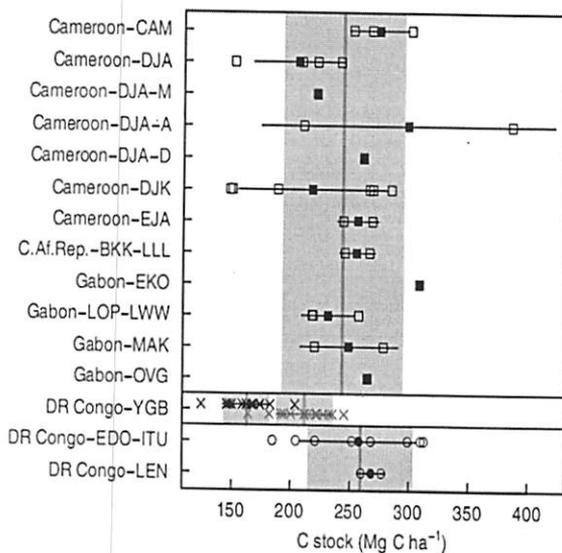


Fig. 18 : Stocks de carbone au bassin du Congo. Source : Modimea, 2013c.

Tableau 12 : Comparaison des résultats avec ceux des autres systèmes.

Types forestiers	Ct/ha	Références
Forêt primaire	300	Palm et al., 2000
Forêt exploitée	100-200	Palm et al., 2000
Agroforêt	40-60	Palm et al., 2000
Jachère longue	88	Palm et al., 2000

En substance, la confrontation sera axée sur des estimations bien localisées au détriment des valeurs moyennes globales. Car, elles dissimulent très souvent les disparités des zones d'inventaire. Le tableau précédent permet de se rendre compte que la forêt primaire peut sous certaines conditions stocker jusqu'à 300 t/ha. La forêt exploitée à cause de la réduction importante de la surface terrière d'un peuplement forestier tropical humide (p.ex. 30 m²/ha à moins de 20 m²/ha peut amener un changement profond dans la dynamique forestier et mettre en péril sa régénération tant en terme de diversité que de biomasse (Ebuy, 2009b).

CONCLUSION ET SUGGESTIONS

Cette présente étude avait pour principaux objectifs de cartographier les différentes formations végétales à la réserve forestière de Yoko et d'évaluer leurs paramètres dendrométriques. Face à cette vague de stocks de carbone ponctuels aérien, il a été jugé subséquemment utile de caractériser spatialement les espèces ligneuses et les classes d'occupation du sol. Les résultats obtenus montrent que :

- Sept classes d'occupation du sol étaient à retenir à savoir la forêt primaire mixte la forêt secondaire, la forêt à *Gilbertiodendron dewevrei*, la forêt dégradée et jachère, la surface d'eau, les abbas-cultures et les sols nus.
- La classification supervisée est modérée avec un indice Kappa de 55,95 %.
- Le seuil de similarité dans les comportements des espèces se situe à 56,84 %.
- Toutes les espèces n'ont pas la même contribution dans la zone forestière en stock de carbone. Les espèces *Gilbertiodendron dewevrei* et *Hymenocardia ulmoides* se sont montrées indifférentes respectivement par rapport au stock de carbone et la surface terrière pour une contribution positive et la densité relative dans l'échantillonnage.
- Outre l'espèce *G. dewevrei*, les arbres relativement dominants pour la forêt primaire signalés dans la littérature ne sont pas apparemment ceux qui regorgent plus de stock de carbone.
- *Scorophloeus zenkeri* et *Gilbertiodendron Kisantuens* contribuent d'une manière assez indiscrete de la mosaïque formé par le reste des espèces par rapport aux variables stock de carbone, la surface terrière et la densité relative.
- Les classes d'occupation sont des unités distinctes par rapport stock de carbone d'après le test de Khi-carré sous un seuil de probabilité $p < 0.001$.
- Le pic moyen le plus élevé se situe dans la forêt à *Gilbertiodendron dewevrei* (397,47 t/ha) et respectivement par ordre décroissant en forêt primaire mixte (221,75 t/ha), forêt secondaire (217,82 t/ha) et forêt dégradée et jachère (141,32).

A la lumière des résultats obtenus par cette étude, quelques propositions déduites pour les recherches ultérieures et applications sont résumées dans les lignes suivantes :

- Que des études sur la dynamique de peuplement de différentes classes d'occupation du sol soit réalisées en vue d'appuyer la suivie du processus stock et émission de carbone au sein de la R.F. de Yoko.
- Que cette étude soit parachevée par la modélisation du stock de carbone au moyen d'une analyse spatio-temporelle avec plus de points d'inventaire et en intégrant des cofacteurs afférents aux caractéristiques du milieu d'étude.
- Que les résultats de la caractérisation spatiale s'annonce comme une interpellation, vu que la majorité des espèces laissent entrevoir un potentiel de stockage futur. D'où alors, face au taux de déforestation de 1,8 %/an (Tshatshambe, 2012), d'une déforestation manifeste en forêt primaire et secondaire (Tumba, 2013) et du bas niveau de revenu des occupants. Il urge d'envisager dans le cadre de REDD⁺, une politique de réduction du niveau des gaz à effet de serre en mettant la forêt à contribution, d'autant plus que la valeur socio-écologique de peuplement peut s'avérer plus rentable que la libération impitoyable du carbone pour des fins de l'agriculture sur brûlis.
- Vu que la capacité de séquestration du carbone des écosystèmes terrestres est déterminée par la taille des stocks de carbone en conditions de quasi-équilibre, le bilan entre les flux entrants et sortants et la stabilité à long terme des stocks (Cassart, 2013).

Que les résultats sur la caractérisation spatiale des espèces en particulier le *G. dewevrei* puisse attirer une attention indispensable dans un éventuel processus d'aménagement de la R.F. de Yoko. Car, les interventions sylvicoles peuvent être malencontreuses sur la biodiversité (le point 1.1.7.).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bandjoko, D., 2010.** *Etudes de la structure des émergents et dominants dans le bloc sud du dispositif de la réserve forestière de la Yoko.* Mémoire. FS/UNIKIS, 58p.
- Batsielili, 2008.** *Phénologie et régénération des espèces ligneuses arborées en forêt tropicale humide : cas d'Afrormosia (Pericopsis elata) et du tola (Prioria balsamifera) en RDC.* Mémoire de master. FS/UNIKIS, 54p.
- Boyemba, B., 2006 :** *Diversité et régénération des essences forestières exploitées dans les Forêts des environs de Kisangani (RD Congo).* Mémoire de DEA, ULB, Bruxelles, 101p.
- Croiser, C. et Trefon, T., 2007.** *Quel avenir pour les forêts de la République Démocratique du Congo ? Instruments et mécanismes innovants pour une gestion durable des forêts,* Michiels, Bruxelles, 83p.
- DEF, 1996.** *Le cycle du carbone et la forêt : de la photosynthèse aux produits forestiers.* Campagna, Quebec, 47p.
- Dubé A. et al., 2006.** Forêt urbaine et puits de carbone. In: **Gilles Sénécal.** (éd.) *Penser le renouvellement de la politique de conservation de la forêt urbaine à l'ère du réchauffement climatique,* Carignan, Montréal (Quebec), 1-50 pp.
- Duminil, T., 2007.** *Exploitation de données de Télédétection en vue d'étudier la mise en place de l'Ecotourisme dans la Région d'ANDAVADOAKA (Madagascar).* Rapport de stage de Deuxième année de SUPAGRO Montpellier, IRD (Institut de Recherche pour le Développement), Maison de la Télédétection, 19p.
- Ebuy, A., 2009.** *Estimation du stockage de carbone dans les plantations de l'I.N.E.R.A.-Yangambi à Yangambi (R.D.Congo).* Mémoire. FS/UNIKIS, 102p.
- Gillet, J., 2013.** *Les forêts à marantaceae au sein de la mosaïque forestière du Nord de la République du Congo : Origines et modalités de gestion.* Thèse. UNIVERSITE DE LIEGE-GEMBOUX AGRO-BIO TECH, 194p.

- Huete, A.R., 1989.** Soil influences in remotely sensed vegetation canopy spectra. *Theory and application of optical remote sensing*, 1989, n°, 107-141 pp.
- Ibanda, B., 2012.** *Etude écologique des forêts semi-caducifoliées à Gilletiodendron kisantuense (Vermoesen ex De Wild.) J. Léonard dans la Réserve forestière de Yoko (Ubundu, R.D. Congo)*. Mémoire. FS/UNIKIS, 71p.
- Ilunga, C., 2012.** *Cartographie par télédétection de l'occupation du sol dans la ville de Kisangani et sa périphérie entre 2002 et 2010*. Mémoire. FS/UNIKIS, 58p.
- Jensen, J.R., 2000.** *Remote sensing of the environment: an Earth resource perspective*. Upper Saddle River : NJ : Prentice Hall, 544p.
- Kahindo, J.M., 2007.** *Inventaire des produits forestiers végétaux non ligneux et leur commercialisation dans la ville de Kisangani*. Dea. Unikis, Fac. des sciences. 83p.
- Kearsly, E., 2012.** *Characterizing spatial variability of tropical rainforest structure using hemispherical photography, in the reserves of Yangambi and Yoko (DRC)*. Thèse. Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen/UNIVERSITEIT GENT, 45p.
- Lomba, C., 2012.** *Systèmes d'agrégation et structures diamétriques en fonction des tempéraments de quelques essences dans les dispositifs permanents de Yoko et Biaro*. Thèse. Unikis, Fac. des sciences. 335p.
- Makana, J., 2010.** *Mesure des stocks de carbone aérien dans les forêts du bassin du Congo*. Wildlife Conservation Society, Ituri (RDC), 10-44 pp.
- Masheka, B., 2009.** *Étude socio-économique des communautés riveraines de la réserve forestière de Yoko (Province Orientale, RDC)*. Mémoire. FS/UNIKIS, 143p.
- Marien, J., 2013.** *Quand la ville mange la forêt. Les défis du bois énergie en Afrique centrale*, France : Paris, Ed Quae, 119-173 pp.

- Maréchal, J., 2012.** *Caractérisation de la dynamique d'occupation du sol de la ville de kisangani et sa périphérie entre 2002 et 2010.* Mémoire. Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, 76 p.
- Mate, J., 2014.** *Cours d'administration et Gestion des aires protégées.* II^e Grade Eaux et Forêt, FGRNR/UNIKIS, 27p.
- MECNT et WRI, 2010.** *Atlas forestier interactif de la République Démocratique du Congo - version 1.0 : Document de synthèse.* Hyacinth Billings, Washington, D.C., 68 p.
- MICROSOFT ÉTUDES, 2009.** Encyclopédie Encarta. Le rejet du carbone dans l'atmosphère. Microsoft Corporation, USA.
- Misser, F., 2013.** *Parcs et réserves en République Démocratique du Congo.* *Rev. d'Ardenne et Gaume*, 68, 4-52 pp.
- Modimea, R., 2013.** *Estimation des stocks de carbone des classes d'occupation du sol dans la réserve forestière de la Yoko par télédétection (Ubundu, RD. Congo),* Mémoire. FGRNR/UNIKIS, 42p.
- Mulia, R. et Dupraz C., 2005.** Unusual fine root distributions of two deciduous tree species observed in Southern France: what consequences for root dynamics modelling? *Plant and Soil*, 281, 71-85 pp.
- Musepena, D., 2009.** *Etudes des forêts monodominantes à Gilbertiodendron dewevrei. Dewild sur les plaques le long de la rivière Yoko.* Mémoire. FS/UNIKIS, 63p.
- Nyembo, F., 2012.** *Contribution à l'étude de la dynamique forestière : accroissement diamétrique et évolution du stock de carbone dans la forêt semi-caducifoliée de la réserve de Yoko (Ubundu, RD. Congo).* Mémoire. FS/UNIKIS, 46p.
- Novak, D.J., et al., 2000.** *Brooklyn's Urban Forest,* United States Department of Agriculture, Forest service, Northeastern Research Station, 83-94 pp.
- Puissant, A., 2014.** *Cours de photo-interprétation et télédétection.* L3-CM7 GO 651, Institution Caen, 14p.

- Ronald, J., 2006.** *Idrisi Andes. Guide to GIS and Image Processing.* Clark University, Worcester (USA), 327p.
- Slater, P.N., 1980.** *Remote sensing optics and optical systems.* Reading: Addison-Wesley, [s.l.], 576p.
- Thompson, J. et al. 2004.** «Iowa, U.S, Communities benefit from a tree-planting program: Characteristics of recently planted trees», *Journal of Arboriculture*, vol. 30, no 1.
- Tshatshambe, G., 2011.** *Étude de la dynamique du couvert forestier d'une forêt tropicale humide suivie par télédétection spatiale. Cas de la Réserve Forestière de Yoko et ses environs (Ubundu, R.D.Congo).* Mémoire. FS/UNIKIS, 37p.
- Tshibamba, J., 2010.** *L'antracomasse dans le sol (cas des réserves forestières de Masako, Yoko, Yangambi et forêt de Kole, province orientale, RDC).* Mémoire. FGRNR/UNIKIS, 31p.
- Tumba, B., 2013.** *Dynamique de l'Occupation du sol dans la réserve forestière de la Yoko entre 1984 et 2010.* Monographie. FGRNR/UNIKIS, 33p.

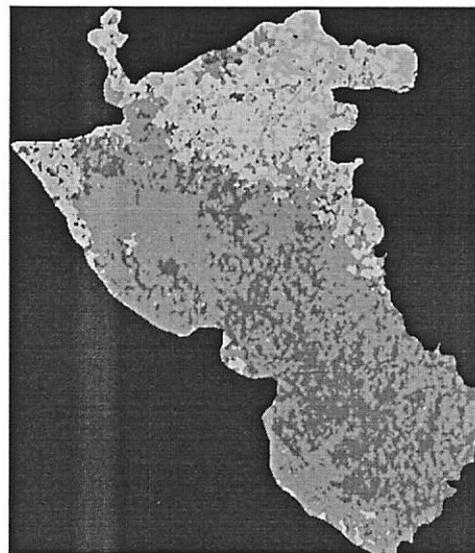
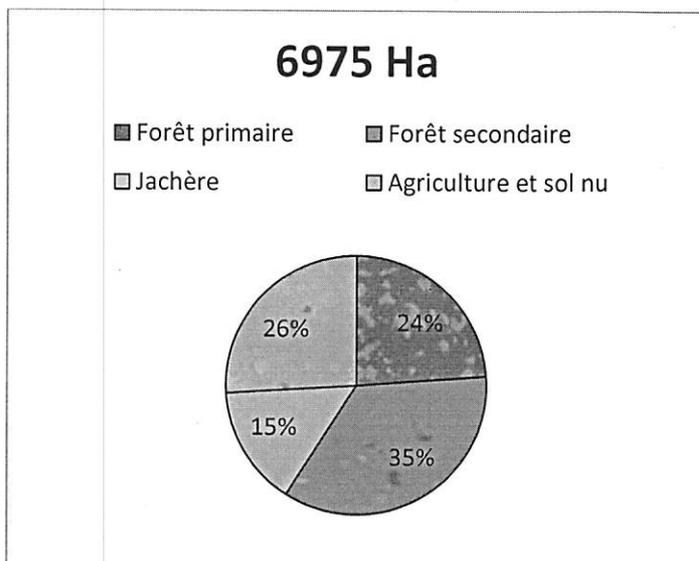
WEBOGRAPHIE

- Boonet, E., 2012.** Initiation à la photo—interprétation. Photographie aérienne. Consulté : le 2/02/2014. URL : http://www.arte.tv/fr/content/tv/02_Communities/C4-knowledge_20and_20discovery/02Magazine/10_ARTE_Sciences/07_Animations/Le_20Spectre_20Ele_20_20Das_20Elektromag/366992.html
- Brown, 2002.** Estimating biomass and biomass change of tropical forest: a primer. FAO Forestry paper, n°134, Rome Italy. Consulté: 7/03/2014. URL: <http://www.fao.org/dorcrep/W4095E/W4095E00/>
- Camille S., 2009.** Stocker du CO₂, est-ce risqué ? Consulté : 20/004/2014. URL: <http://www.rfi.fr/auteur/camille-sarret/>
- Cassart, B., 2013.** Bio-géochimie des écosystèmes forestiers et gestion durable– cat_SCI «La diversité ligneuse en forêt tropicale permet-elle de maximiser la séquestration du carbone? Consulté : 7/03/2014. URL: <http://www.ucl.ac.be/>
- Decocq, M., 2013.** Microclimate moderates plant responses to macroclimate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Consulté : 1/06/2014. URL: <http://www.techno-science.net/?onglet=news&news=12223>
- Jean-Marc, 2007.** Les puits de carbone ne vont-ils pas absorber le surplus de CO₂ ? Consulté le 14/ 05/2014.URL : <http://www.manicore.com/>
- Joannidis M., 2010.** Amazonie, Congo, Indonésie et Sibérie sur la forêt pour sauver les poumons de la planète. Consulté le 13/ 05/2014.URL : <http://www.rfi.fr/>
- Moonen et al., 2014.** Accurate assessment of Congo basin forest carbon stocks requires forest type specific assessments. Consulté : le 25/06/2014. URL : <http://www.adsabs.harvard.edu/>
- Pan et al., 2011.** Première étude globale sur le rôle des forêts comme puits de carbone. Consulté le 18/07/2014. URL : <http://www.planet-techno-science.com/>
- Robinne, F.N., 2013.** Les premières images Landsat 8. Consulté le 18/07/2014. URL : <http://www.portalsig.org/>

Stern N., 2006. Comment gérer la lutte contre le changement climatique et la croissance ?
Consulté le 1/01/2014. URL : <http://www.techno-science.net/>

Walker et *al.*, [2013?]. Guide de Terrain pour l'Estimation de la Biomasse et le Carbone
Forestier. Consulté : 7/03/2014. URL : <http://www.whrc.org/>

Annexe 1. Mesures surfaciques des classes d'occupation du sol



Classes d'occupation	Ha
Forêt primaire	1674
Forêt secondaire	2441,25
Jachère	1046,25
Agriculture et sol nu	1813,5