



HAL
open science

ESTIMATION ET SPATIALISATION DU STOCK DE BIOMASSE ET CARBONE AÉRIEN DES MANGROVES ESTUARIENNES AU GABON.

Igor Akendengue Aken

► **To cite this version:**

Igor Akendengue Aken. ESTIMATION ET SPATIALISATION DU STOCK DE BIOMASSE ET CARBONE AÉRIEN DES MANGROVES ESTUARIENNES AU GABON.. Sciences de l'environnement. UNIVERSITE OMAR BONGO, 2021. Français. NNT: . tel-04522949

HAL Id: tel-04522949

<https://theses.hal.science/tel-04522949>

Submitted on 27 Mar 2024

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

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

Copyright



UNIVERSITÉ OMAR BONGO

Faculté des Lettres et Sciences Humaines

Département des Sciences Géographiques, Environnementales et Marines

FORMATION DOCTORALE EN SCIENCES GÉOGRAPHIQUES

Laboratoire de Géomatique, de Recherche Appliquée et de Conseil (LAGRAC)

THÈSE

Pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Université Omar Bongo de Libreville

Discipline : *Géographie et Environnement* – Spécialité : *Biogéographie*

ESTIMATION ET SPATIALISATION DU STOCK DE BIOMASSE ET CARBONE AERIEN DES MANGROVES ESTUARIENNES DU GABON

Présentée et soutenue publiquement le 29 /10/ 2021 par :

Igor AKENDENGUE AKEN

Sous la co-direction de :

- **Jean Bernard MOMBO**, Professeur Titulaire (CAMES) de Géographie physique et environnementale, Université Omar Bongo, Directeur
- **Gordon Nwutih AJONINA**, Ph.D., Ing., Programme Mangrove et Forêts Côtières *Cameroon Wildlife Conservation Society (CWCS)*

Membres du Jury

Marc-Louis ROPIVIA	Professeur Titulaire, Université Omar Bongo de Libreville (Gabon).	Président
Jean-Joel LOUMETO	Professeur Titulaire, Université Marien NGOUABI de Brazzaville (Congo).	Rapporteur 1
Alfred NGOMANDA	Maitre de Recherches, Institut de Recherches en Ecologie Tropicale, CENAREST (Gabon).	Rapporteur 2
Mesmin Clet EDOU EBOLO	Maitre de Conférences, Université Omar Bongo de Libreville (Gabon).	Examineur
Jean Bernard MOMBO	Professeur Titulaire, Université Omar Bongo de Libreville (Gabon).	Directeur
Gordon Nwutih AJONINA	Expert Mangrove International, Programme Mangrove et Forêts Côtières [<i>Cameroon Wildlife Conservation Society (CWCS)</i>], Mouanko (Cameroun).	Co-Directeur



UNIVERSITÉ OMAR BONGO

Faculté des Lettres et Sciences Humaines

Département des Sciences Géographiques, Environnementales et Marines

FORMATION DOCTORALE EN SCIENCES GÉOGRAPHIQUES

Laboratoire de Géomatique, de Recherche Appliquée et de Conseil (LAGRAC)

THÈSE

Pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Université Omar Bongo de Libreville

Discipline : *Géographie et Environnement* – Spécialité : *Biogéographie*

ESTIMATION ET SPATIALISATION DU STOCK DE BIOMASSE ET CARBONE AERIEN DES MANGROVES ESTUARIENNES DU GABON

Présentée et soutenue publiquement le 29 /10/ 2021 par :

Igor AKENDENGUE AKEN

Sous la co-direction de :

- **Jean Bernard MOMBO**, Professeur Titulaire de Géographie physique et environnementale (CAMES), Université Omar Bongo, Directeur
- **Gordon Nwutih AJONINA**, Ph.D. Ing., Programme Mangrove et Forêts Côtières *Cameroon Wildlife Conservation Society (CWCS)*

Membres du Jury

Marc-Louis ROPIVIA	Professeur Titulaire, Université Omar Bongo de Libreville (Gabon).	Président
Jean-Joel LOUMETO	Professeur Titulaire, Université Marien NGOUABI de Brazzaville (Congo).	Rapporteur 1
Alfred NGOMANDA	Maitre de Recherches, Institut de Recherches en Ecologie Tropicale, CENAREST (Gabon).	Rapporteur 2
Mesmin Clet EDOU EBOLO	Maitre de Conférences, Université Omar Bongo de Libreville (Gabon).	Examineur
Jean Bernard MOMBO	Professeur Titulaire, Université Omar Bongo de Libreville (Gabon).	Directeur
Gordon Nwutih AJONINA	Expert Mangrove International, Programme Mangrove et Forêts Côtières [<i>Cameroon Wildlife Conservation Society (CWCS)</i>], Mouanko (Cameroun).	Co-Directeur

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	i
SIGLES, ABREVIATIONS ET ACRONYMES	ii
DEDICACE.....	iii
REMERCIEMENTS	iv
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
Partie I: CADRE PHYSIQUE ET METHODES.....	23
CHAPITRE I : Aspects physiques et généralités	25
CHAPITRE II: Méthodes de l'étude	55
Partie II : MODÉLISATION ET SPATIALISATION DE LA BIOMASSE ET DU CARBONE PAR TÉLÉDÉTECTION	74
CHAPITRE III: Équation allométrique du peuplement des mangroves.....	76
CHAPITRE IV: Équation allométrique par télédétection	110
Partie III : FACTEURS DE DISTRIBUTION SPATIALE DE LA BIOMASSE ET DU CARBONE DES MANGOVES	138
CHAPITRE V: Modèle de distribution de DBH.....	140
CHAPITRE VI: Les Facteurs de distribution spatiale de biomasse et de carbone des mangroves	182
CONCLUSION GÉNÉRALE	211
BIBLIOGRAPHIE	218
ANNEXES	237
ILLUSTRATIONS	242
TABLE DES MATIÈRES.....	253

SIGLES, ABREVIATIONS ET ACRONYMES

AGB : <i>Aboveground Biomass</i> (stock de biomasse aérien)	Gt : Giga tonne
AGC : <i>Aboveground Carbon</i> (stock de carbone aérien)	Ht : Hauteur
AGCO² : <i>Aboveground Carbon Dioxyde</i> (stock de dioxyde de carbone aérien)	ha : Hectare
AGEOS : Agence Gabonaise d'Etudes et d'Observations Spatiales	INC : Institut National de Cartographie
AIC : Critère d'Information d'Akaike	IRAF : Institut des Recherches Agronomiques et Forestières
ANPN : Agence Nationale des Parcs Nationaux	kg : Kilogramme
BIC : <i>Bayesian Information Criterion</i> (Critère d'Information Bayésien)	LAGRAC : Laboratoire de Géomatiques de Recherche Appliquée et de Conseil
BGB : <i>Belowground Biomass</i> (stock de carbone souterrain)	LiDAR : <i>Light Detection and Ranging</i> (Détection Laser et Télémétrie)
C : Carbone	MDMLERD : Modélisation de la Dynamique des Mangroves de Libreville et ses Environs et des Risques de leur Dégradation
CDF : <i>Cumulative Distribution Function</i> (Fonction de Distribution Cumulative)	Mg : Méga gramme
CI : Carbone Inorganique	MNV : Mesure, Notification et Vérification
CID : Carbone Inorganique Dissous	NASA : <i>National Aeronautics and Space Administration</i> (Administration Nationale de l'Aéronautique et de l'Espace)
CNUCC : Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques	pH : potentiel d'Hydrogène
CO : Carbone Organique	QGIS : <i>Quantum Geographic Information System</i> (Système d'Information Géographique Quantitatif)
CO₂ : dioxyde de carbone	RADAR : <i>Radio Detection And Ranging</i> (Détection Radio et Télémétrie)
CWCS : <i>Cameroon Wildlife Conservation Society</i> (Société Camerounaise de Conservation de la Nature)	RDC : République Démocratique du Congo
DBH : <i>Diameter Breast Height</i> (Diamètre à hauteur de poitrine)	REDD : Réduction des Emissions dues à la Déforestation et à la Dégradation forestière
DGEPN : Direction Générale de l'Environnement et de la Protection de la Nature	REDD++ : Réduction des Emissions dues à la Déforestation et à la Dégradation forestière la conservation, la gestion durable des forêts et le renforcement des stocks de carbone forestier
DGS : Direction Générale de la Statistique	RMSE : <i>Root Mean Square Error</i> (Erreur Quadratique Moyenne)
DLR : <i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i> (Centre Allemand de recherche spatiale)	SAGA : <i>System for Automated Geoscientific Analyses</i> (Système Automatique pour l'Analyse Géoscientifique)
DSAS : Dynamiques Spatiales, Activités & Sociétés	t : Tonne
ENEF : Ecole Nationale des Eaux et Forêts	t ha⁻¹ =Mg ha ⁻¹
ENS : Ecole Normale Supérieure	UNEP/PNUD : <i>United Nations Environment Programme (UNEP) /Programme des Nations Unies pour l'Environnement</i>
ESA : Agence Spatiale Européenne	USTM : Université des Sciences et Techniques de Masuku
FAN : <i>Forestry Association Nigeria</i> (Association de Foresterie du Nigeria)	α : <i>alpha</i>
FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture	β : <i>bét</i>
GES : Gaz à Effet de Serre	
GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat	
GIELM : Gestion Intégrée des Environnements Littoraux et Marins	

DEDICACE

Je dédie ce travail à:

- **Marie-Augustine IWENGA**: celle à qui je dois toutes mes études secondaires et universitaires, et dont les conseils sont les poutres de ma persévérance et ma vision de l'avenir.
- **Bernard Ryvé AKENDENGUE**, pour m'avoir donné la détermination à faire une thèse au Gabon, à la grande surprise de tous.

REMERCIEMENTS

Ce projet a été à l'initiative d'un seul auteur, mais son aboutissement a été l'œuvre de plusieurs acteurs qui ne sauraient passer sous silence. Ainsi, je remercie particulièrement Messieurs Jean Bernard MOMBO et Gordon Nwutih AJONINA, d'une part, pour avoir accepté de diriger ce travail en dépit de leurs nombreuses occupations et, d'autre part, pour l'appui multiforme sur le terrain et en laboratoire. Leurs expériences, rigueurs et conseils ont été mon seul fil conducteur tout au long de cette aventure scientifique dans les chenaux des mangroves. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma plus grande gratitude et admiration.

J'adresse un grand merci au Directeur du Laboratoire de Géomatique de Recherche Appliquée et de Conseil (LAGRAC), Pr Jules DJEKI, pour l'apport matériel et financier et à toute son équipe pour les conditions de travail. Mes remerciements vont au Dr Marjolaine OKANGA-GUAY, Dr Laetitia Guylia ROGOMBE, Dr Nadine NDONGHAN IYANGUI, Dr Emmanuel ONDO ASSOUMOU, Dr Michel MBADINGA, Dr Dieudonné MOUKETOU TARAWEWICZ, Dr Médard OBIANG EBANEGA et Dr Jean Aurelien MOUKANA LIBONGUI pour le soutien sur le terrain et les conseils et pistes de réflexion.

Mes remerciements vont également au Coordonnateur National de Société Camerounaise de Conservation de la Nature (*Cameroon Wildlife Conservation Society* ; CWCS), Dr Gordon Nwutih AJONINA, et à toute son équipe à Mouanko au Cameroun, pour les conditions de travail et d'accueil durant mon merveilleux séjour au Cameroun. Merci aussi à Mme MUMBANG COLEEN, à M. Oumar FAYSAL, Jean IGRI, Eugene DIYOUKE, Laurant NYAMSI MOUSSIAN et Laisin BRUNO, pour leurs soutiens et apports multiformes lors de mon passage au CWCS à Mouanko, dans la région littorale au Cameroun.

Je tiens également adresser mes très sincères remerciements à tous ceux dont les conseils m'ont été d'une grande utilité, à savoir :

- Pr John Boone KAUFFMAN, de l'Université de Covaris en Oregon aux USA, qui est l'un des pionniers mondiaux dans le domaine du carbone des mangroves. Avec lui, nous avons fait un stage de deux semaines de formation sur le terrain dans les mangroves du complexe protégé de Gamba et du Parc Akanda en 2014. Une partie du matériel d'échantillonnage utilisé au cours de notre recherche est une dotation de sa part. Malgré leurs nombreuses occupations, son assistant Dr Rupesh BHOMIA et lui-même ont interagi avec moi tout au long de ce travail ;
- Dr Marc SIMARD du *Jet Propulsion Laboratory (JPL)* à *California Institute of Technology* de la NASA, Dr Carl TRETTIN de US FOREST et l'équipe de mission NASA sur les mangrove au Gabon, dont la précieuse collaboration avec Dr Médard OBIANG EBANEGA a permis la mise en ma disposition de la base de données de mangrove de l'Estuaire du Komo ;
- Pr Jean Luc DIMI, de la Faculté de Mathématique de l'Université Marien Nguabi de Brazzaville au Congo, pour m'avoir permis de prendre part à l'Ecole de Mathématique de Brazzaville édition 2018 ;
- Pr Armel ANDAMI OVONO, du Département de Mathématique et Informatique de l'Université des Sciences et Techniques de Masuku (USTM) ; ses nombreux conseils et orientations dans l'analyse mathématique ont guidé mes pas en statistique spatiale ;
- Dr Marjolaine OKANGA-GUAY et Dr Emmanuel ONDO ASSOUMOU, qui m'ont été d'un suivi permanent. Leurs conseils et séances de travail m'ont toujours permis de déboucher vers des nouvelles pistes de recherche. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma plus grande gratitude ;

- Dr Jean Paul OBAME ENGONE, une mention particulière à son égard, pour les séances d'analyse mathématique sur Rstat. Grâce lui, j'ai découvert et compris les analyses multidimensionnelles et multivariées ;
- Dr Magloir-Désiré MOUNGANGA, pour le soutien matériel, avec notamment la mise à disposition des gilets de sauvetage et le prêt du multiparamètre, pendant que celui du LAGRAC se trouvait en réparation en Pologne ;
- M. Bayonne ADDO LIVITH, du Laboratoire des Sciences Naturelles de l'Ecole Normale Supérieure (ENS), où j'ai réalisé les pesées d'aliquotes ;
- M. Dieudonné NZENG BORO, du Laboratoire des sols de l'Institut des Recherches Agronomiques et Forestières (IRAF), où j'ai conditionné mes aliquotes à l'étuve.

Mes remerciements vont également à l'endroit de l'ensemble des membres du projet « Modélisation des Mangroves de Libreville et ses Environs et des Risques de leurs Dégradations » (MDMLERD), ainsi que les étudiants des 4^{ème} et 5^{ème} promotions du Master recherche en « Dynamiques Spatiales, Activités et Sociétés » (DSAS) et à la 2^{ème} promotion du Master régional professionnel en « Gestion Intégrée des Environnement Littoraux et Marins » (GIELM), qui m'ont accompagné sur le terrain.

Je tiens également à remercier :

- les populations des villages Chinchoua, Donguila, Matek-Mavi, Bolokouboué, Oveng, Mamboumba et l'ensemble des communautés de pêcheurs de Cocobeach, pour leur accueil chaleureux ;
- les familles : Adjougui, Onanga Lemba, Koumba Iwangou, Nouhando, Akendengué Akonta, Doukaga J.-Y., Bengone Ndong, Ndong Beka, pour le soutien qu'ils nous ont apporté ;
- mes frères sœurs, et mes enfants Immaculé Iwenga, Eli Bernard Bengone Akendengué, Noé Eden Oyono Akendengué, pour toute l'affection que j'ai pour eux et en ces longs jours d'absence ;
- mes promotionnaires : Christie Achtone Nkollo Aganga, Lyn Randy Essono Mbega, pour le respect et l'amour que j'ai pour eux et pour leur témérité à vouloir faire des thèses au Gabon et à l'UOB ;
- mes promotionnaires de l'avunculat : Armel S. Biboutou, Emmanuel Gerald Libongui, Audin Mouanga Papé, Dimitri Essono Milla, Cédric Mpie Simba, Michel Ngui Ondo.
- Anaïck Modinga Dikongo, Charles Bissielou Mapangou et Claude Moussadji Mapangou, pour leur soutien multiforme ;
- Rodrigue Nouhando et Lucien Bernard Akendengué, pour l'achat du matériel et des ouvrages ;
- Lucien Akendengué et Germaine Maroundou ; qu'ils trouvent ici ma profonde et éternelle gratitude, pour m'avoir donné la vie. «*Véndé mpiri yé penda polo ka wa bomwa ; go dimungui wé tengouna ni nzamba*»¹, encore merci à vous.

In fine, mes chaleureux remerciements vont à ma famille, et à tous ceux qui ont cru en moi et, particulièrement, à ma compagne Philippine Nsefoume Bengone pour son soutien au quotidien.

¹ Traduction de l'Omyenè en Français : « Quelque que soit la teneur de l'obscurité, tu y arriveras ».

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. Contexte et justification du sujet

1.1. Objet et champ d'étude

La superficie globale des mangroves de la Terre est d'environ 140000 km², avec 68 espèces typiques et 268 espèces associées (Giesen et *al.*, 2007). Les mangroves africaines représentent 19% (environ 28000 km² (Niasse et *al.*, 2004)) des mangroves mondiales, dont 59 % (soit 20142 km²) sont présentes sur la façade atlantique et couvrent 4375 km² en Afrique centrale avec 8 espèces (UNEP, 2007 ; Ajonina et *al.*, 2008).

Cette forêt littorale des côtes tropicales et subtropicales est présente dans les estuaires, les deltas, les lagunes et les lagons. Le mot mangrove trouve son origine dans la contraction de deux mots : «*manghi*», qui renvoie au palétuvier en malais, et «*grove*» ou bosquet en anglais (Lebigre, 1983). Elle est constituée des formations édaphiques et halophiles dominées par les palétuviers, et occupe 24 % des côtes tropicales réparties dans 123 pays (Spalding et *al.*, 2011). Les mangroves constituent l'un des écosystèmes les plus productifs de la planète Terre. La mangrove est un véritable poumon économique pour les communautés littorales ; elles s'y nourrissent, s'y soignent et s'y logent.

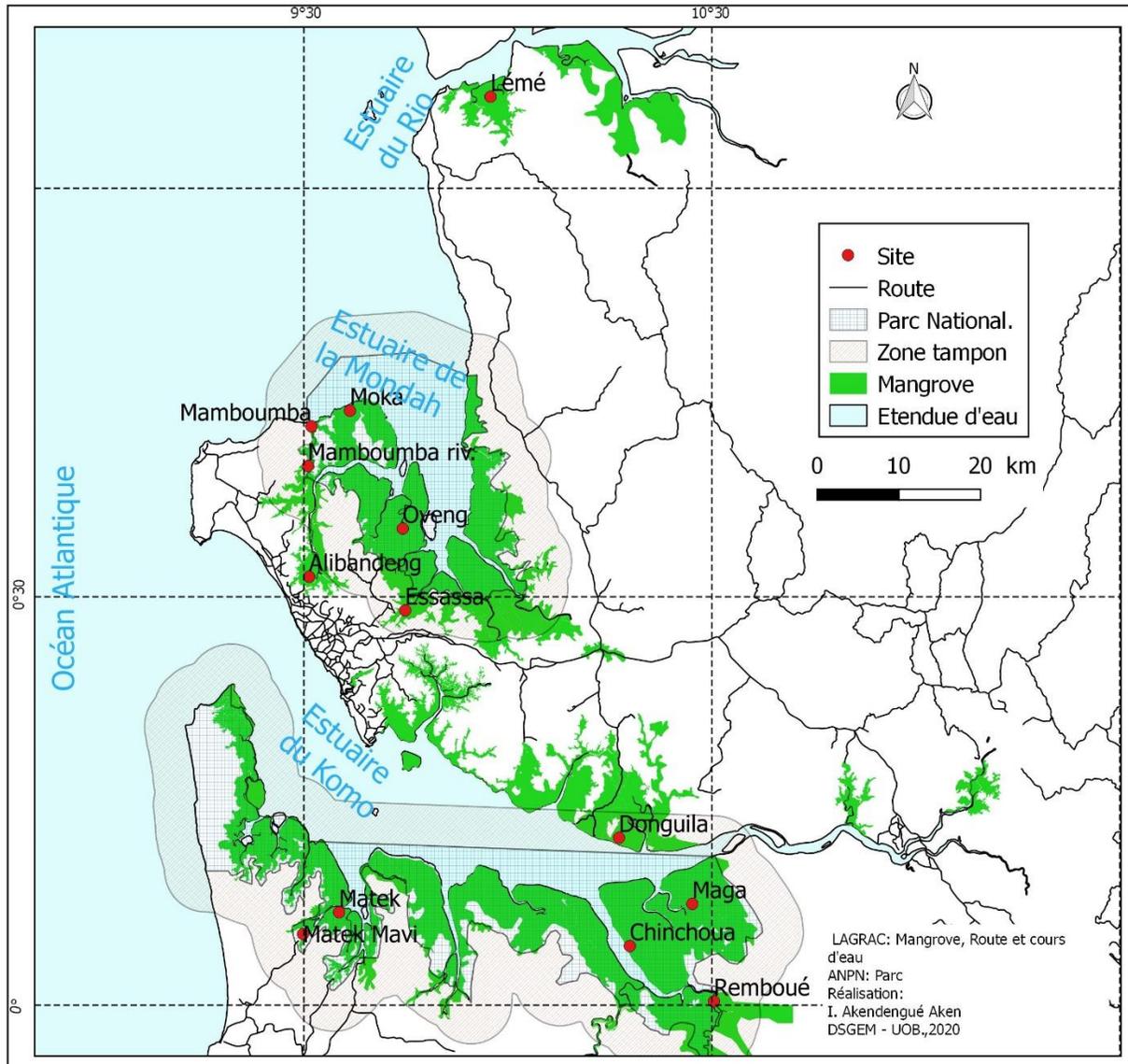
La perte de mangrove sur la côte occidentale de l'Afrique est de 6,887 km², et 2,135 km² en Afrique centrale (FAO, 2005). Ainsi, les phénomènes tels que la déforestation sont à l'origine de libération du carbone contenu dans la végétation et dans la lithosphère (roche, sol, sous-sol). Pourtant, dans un contexte de réchauffement planétaire, de hausse du niveau marin et de récurrence des tempêtes et ouragans, l'écosystème de mangrove est très utile. Les mangroves regorgent de nombreux avantages. Elles servent de rempart contre les tempêtes, les ouragans et les tsunamis. La capacité de séquestration de carbone des mangroves est estimée à 25,5 millions de tonnes par an, avec une contribution de 10% du carbone total des océans (Dittmer et *al.*, 2006). En réalité, tous les végétaux ont cette capacité de capturer le carbone. Toutefois, la particularité de la mangrove est que son sol a une grande capacité de stocker le carbone, favorisée par l'absence d'oxygène (Kauffman et *al.*, 2011). Aussi, la biomasse représente la masse de matière vivante d'une biocénose exprimée en unité de surface (Kg ha⁻¹ ou t ha⁻¹) (Amat et *al.*, 2015). Elle est scindée en deux groupes: la biomasse aérienne (AGB) et la biomasse souterraine (BGB). La première concerne les branches, troncs et feuilles, tandis que la seconde est centrée sur les racines et le sol. Cette masse vivante peut être convertie en carbone pur. En effet, le carbone d'un arbre est l'équivalent de la moitié de sa biomasse (Chave et *al.*, 2005).

Les mangroves de l'estuaire du Komo représentent 40% de la surface de celles du Gabon, soit 1000 km² sur 2500 km² (Lebigre, 1983). « L'estimation et la spatialisation de la biomasse et du carbone des mangroves estuariennes au Gabon » est une préoccupation de la biogéographie fonctionnelle. Celle-ci se matérialise par l'étude de géofaciès et géohorizon du géosystème de mangrove au sens de Beroutchachvili et *al.* (1978) et Saur (2012). La question peut être également abordée sous plusieurs angles disciplinaires : la Botanique, qui intervient uniquement dans les estimations de biomasse de plante par taxon, puisqu'il est question de détermination de stock en fonction des espèces, genres, familles, classes et sous-classes. La Biologie de la conservation, quant à elle, touche des aspects plus larges ; car, elle ne se limite pas seulement à la biomasse des plantes uniquement. Elle agit aussi dans les actions conservatoires à envisager, en fonction de la rareté de stock de biomasse ou d'un taxon particulier. L'Ecologie n'est pas en reste dans les estimations de biomasse. Elle aborde la question de la conversion de biomasse en énergie, et établit les interactions des êtres vivants dans leur milieu, en fonction de la pyramide de biomasse énergie disponible pour la survie de chaque espèce. La Foresterie est également concernée dans les estimations de biomasse, avec la particularité de s'investir sur la valeur marchande de la biomasse forestière, ainsi que sur les actions d'aménagement forestier. La Biogéochimie met en relief les mécanismes de transfert cyclique d'éléments chimiques entre l'environnement et les organismes vivants. Elle est au centre du processus du cycle biogéochimique du globe terrestre, dont l'une des principales composantes est le végétal à travers la photosynthèse. Elle étudie les processus de conversion d'un réservoir à un autre (gazeux, liquide et solide). La Biogéographie est au centre de l'amélioration des estimations de biomasse, à travers les outils que sont la cartographie, la télédétection, les systèmes d'information géographique et la photo-interprétation. Ainsi, la biomasse des grandes étendues spatiales peut être évaluée, à moindre coût et dans un temps raisonnable. La Biogéographie s'intéresse aux facteurs géographiques de répartition de biomasse et de carbone.

1.2. Localisation spatio-temporelle

Le territoire du Gabon (267 667 km²) est subdivisé en 9 provinces, dont celle de l'Estuaire ou des estuaires du pays située dans le Nord-Ouest. La province de l'Estuaire est bordée au Sud-Ouest par celle de l'Ogooué Maritime, au Sud-Est et à l'Est par celle du Moyen Ogooué, à l'Est et au Nord-Est par celle du Woleu-Ntem et, enfin, au Nord par la République de Guinée Équatoriale. Son couvert forestier est estimé à 19500 km², dont 5,12% de mangrove (Carte 1, ci-après).

Carte 1 : Les Mangroves estuariennes au Gabon



La province de l'Estuaire a la plus vaste superficie de mangroves du Gabon, soit 1450 km², regroupant du Nord au Sud les mangroves : des rives gabonaises de l'Estuaire du Rio Mouni, de la Baie ou estuaire de la Mondah et de l'Estuaire du Komo ou du Gabon (Ondo Assoumou, 2017) et 610 km estuariennes pour la plupart bordées de mangroves (Pottier et *al.* 2017). Cette province compte trois parcs nationaux, dont deux sur le littoral, notamment : le Parc National Akanda au Nord, ayant une emprise sur les mangroves des rives de la Baie de la Mondah ; et le Parc National de Pongara au Sud, ayant une emprise sur les mangroves de la rive gauche de l'Estuaire du Komo.

Les principales villes de la province, qui d'ailleurs toutes jouxtent les mangroves, sont Libreville, Owendo, Akanda, Ntoun, Kango et Cocobeach. L'agglomération de Libreville (Libreville, Owendo, Akanda et Ntoun) concentrant le pouvoir politique, l'administration, l'activité économique, les services et la moitié de la population du pays, la pression anthropique sur l'assiette foncière empiète sur les mangroves périurbaines.

Ainsi, en résumé, l'étude porte sur les mangroves de la province administrative de l'Estuaire du Gabon, dans laquelle se trouvent les estuaires du Komo, de la Mondah et du Rio Mouni. Avec 20 740 km² et 895 689 habitants, soit 43 hab. /km² (DGS, 2015), cette région abrite l'agglomération urbaine la plus peuplée du Gabon, le plus grand aéroport et complexe portuaire (port de commerce, port minéralier et port à bois) du pays.

1.3. Intérêt du sujet

La compensation financière préconisée par la Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CNUCC) est basée sur les mesures de biomasse et de carbone, selon un mécanisme de Mesure, Notification et Vérification (MNV). Ces mesures nécessitent un suivi régulier de la biomasse aussi bien spatial que temporel.

De façon générale, les estimations de biomasse sont faites à partir des équations allométriques au sol, grâce aux inventaires de terrain. Les estimations en unité spatiale sont obtenues par méthode d'extrapolation en règle de trois ou facteur d'expansion (Brown et *al.*, 1989 ; Husch et *al.*, 2003 ; Kauffman et *al.*, 2011). La présente étude est le croisement entre la méthode de terrain classique basée sur les équations allométriques et les outils de la télédétection, dans le processus d'estimation et de suivi de la biomasse et du stock de carbone des mangroves au Gabon. Celle-ci

a fait intervenir le pixel, l'infradensité du bois par espèce, la hauteur, le DBH et le volume des arbres ; ainsi que la corrélation entre la hauteur de l'arbre obtenue par télédétection par unité de surface, et la biomasse obtenue à partir des inventaires de terrain. Cette technique a permis d'aboutir à des modèles de régression linéaire et non linéaire d'estimation de biomasse en générale, et de biomasses aériennes (AGB) en particulier, uniquement à partir de la donnée image. Avant d'arriver à ce modèle de régression, la biomasse, qu'elle découle des inventaires de terrain ou de la télédétection optique, radar ou LiDAR, dépend des données de terrain combinées aux équations allométriques. Les équations sont indispensables dans la quantification de la biomasse et du carbone forestier. Elles sont la clé de voûte de tout le processus de calcul et de suivi de la biomasse. Bien que l'équation de Ngomanda et *al.* (2014) fasse figure de référence dans la quantification de biomasse en forêt de terre ferme au Gabon et en Afrique Centrale, les mangroves du Gabon ne disposait pas encore d'équation locale d'estimation de biomasse. L'estimation et la spatialisation de la biomasse et du carbone des mangroves estuariennes au Gabon est une contribution sur les plans scientifiques, environnementaux et même économiques.

Le plan scientifique se caractérise par deux démarches. D'une part, il y a la mise en place des équations allométriques individuelles et spécifiques de volume, de la biomasse, du carbone et du dioxyde de carbone à partir d'un inventaire terrain. Et, d'autre part, il y a l'apport par un ensemble d'outils de télédétection RADAR, qui permet de prédire aussi bien la hauteur, la biomasse, le carbone et le dioxyde de carbone de mangrove. Ainsi, il sera possible de faire le suivi spatial et temporel de la biomasse, du stock de carbone et de dioxyde de carbone dans les grands espaces, à partir des images satellitaires. Les espèces de mangrove et les sites, qui sont le plus pourvus de biomasse et de carbone, seront désormais connus. Ces différentes données pourront servir de base de recherche à la communauté scientifique nationale et internationale.

Sur le plan environnemental et économique, l'ensemble des informations obtenues serviront, d'une part, de base d'orientation de politique d'aménagement ou de conservation des mangroves estuariennes et périurbaines et, d'autre part, alimenteront la base de données nationales et serviront de référence dans le cadre de politique internationale sur la réduction des gaz à effet de serre,

REDD² et REDD+³. La compréhension des facteurs, qui régissent les capacités de stockage de biomasse par rapport au gradient environnemental, sera une base dans les mécanismes de suivi et le processus d'aménagement des mangroves estuariennes par rapport aux villes littorales. Elle est donc à la fois un bouclier dans la conservation des mangroves, et un levier dans la planification et l'aménagement des villes littorales. Couplés aux modèles de distribution, qui déterminent le statut de développement de ces mangroves, elles guideront les actions à mener face aux mangroves périurbaines. Cette compréhension servira de conciliation entre l'aménagement urbain et la conservation de la mangrove en milieu périurbain et, par ricochet, au maintien des services écosystémiques des mangroves pour les communautés riveraines. Elle se veut être un outil, qui sera intégré dans tout processus d'aménagement d'une ville littorale à mangrove.

2. Problématique

2.1. État de la question

Trois types d'études portant sur la forêt tropicale en général ont attiré notre attention. Il est question des travaux liés la mise place des équations allométrique, des travaux liés influences des variables environnementales sur la forêt et des travaux ayant attiré à la cartographe de biomasse et carbone forestier.

D'abord les études consacrée à l'établissement des équations allométriques et sur les estimations de la biomasse forestière (Brown et *al.* 1989 ; Husch et *al.* 2003; Picard et *al.* 2012; Moundounga Mavouroulou et *al.* 2014 ; Ngomanda et *al.* 2014). Les travaux de Brown et *al.* 1989, de Husch et *al.* 2003 et ceux de Picard et *al.* 2012 ont œuvrés dans la méthodologie de mise en place des équations allométriques. Brown et *al.* 1989 et Husch et *al.* 2003 en ont eu le privilège de mettre en exergue le processus d'élaboration par la méthode destructrice et non destructrice en intégrant les limites de formes des équations déjà existantes : celle de Newton et celle de Smalien. Picard et *al.* (2012) quant à eux s'accrochent sur la méthode destructrice mais, ils ont eu l'avantage d'insérer

² Réduction des Émissions dues à la Déforestation et à la Dégradation des Forêts (REED).

³ Réduction des Émissions dues à la Déforestation et à la Dégradation des Forêts, la conservation, la gestion durable des forêts et le renforcement des stocks de carbone forestier (REDD+).

le code R pour les analyses de données. Ils évoquent également le rôle que jouerait la géographie à travers l'analyse spatiale dans les études d'estimation de biomasse forestière tout en rappelant que l'utilisation de la cartographie est une recommandation du GIEC, 2001.

Sur le plan local en matière de forêt en générale, Moundounga Mavouroulou et *al.* 2014 démontrent que le choix des équations allométriques à utiliser et l'erreur de mesure de terrain pour le calcul de volume sont les deux écueils dans les études d'estimation de biomasse. Les travaux de Ngomanda et *al.* 2014 établissent que les études d'estimation de biomasse en Afrique centrale posent le problème de l'insuffisance des équations spécifiques. Cette situation conduit le chercheur à opter pour des équations allométriques pantropicales. Or, les équations pantropicales sont généralement biaisées en Afrique à cause du manque données en témoigne l'équation pantropicale de Chave et *al.* (2005) qui n'a pas disposé donnée de l'Afrique centrale dans son élaboration Ngomanda et *al.* 2014.

Ensuite, nous nous sommes intéressés aux études liées à l'influence du gradient environnemental sur la structuration spatiale d'une forêt humide (Obame Engone, 2015). A cet effet, les questions de l'influence du gradient environnemental dans les forêts humides au Gabon ont été abordés par Obame Engone (2015) dans sa thèse intitulée «*Structure spatiale et dispersion des communautés d'arbres en forêt tropicale humide du Gabon : rôle des facteurs édaphiques et du gradient de chablis*». L'auteur se sert de l'analyse en composante principale et de l'arbre de régression multivariables pour déterminer l'influence édaphique de la répartition spatiale des arbres en forêt humide. Avec l'analyse de correspondance multiple l'auteur a démontré que 30 espèces d'arbres sont associées aux variables environnementales. Cette approche qui n'a pas encore été appliquée dans les études de mangrove au Gabon nous en inspire. En effet, cette approche de gradient nous a conduits vers la compréhension du rôle des variables physico-chimiques dans la distribution spatiale de biomasse du stock de carbone aérien des mangroves.

Enfin, les études ayant attrait avec la cartographie de la biomasse et le carbone par télédétection optique et aéroportée en forêt tropicale (Baccini et *al.* (2008 ; 2012); (Saatchi et *al.* 2011) ; (Mitchard et *al.* 2012 ; 2013) ; Langner et *al.* 2014). En effet, Baccini et *al.* 2008 élaborent la première carte d'estimation de biomasse de forêt tropicale africaine à partir des données MODIS.

Parallèlement, Saatchi et *al.* 2011 mettent en place également une carte d'estimation de biomasse pantropicale à partir du LiDAR à 1 km de résolution. De même que Baccini et *al.* 2012 élaborent aussi une carte de biomasse pantropicale avec du LiDAR à 500 m de résolution. Ces deux cartes ont produit un résultat contradictoire en Afrique notamment en République Démocratique du Congo et au Gabon. En effet, la carte de Saatchi et *al.* 2011 identifie le Gabon avec les plus grande réserve de biomasse. Tandis que la carte de Baccini identifie plutôt la République Démocratique du Congo comme ayant les plus grands stocks de biomasse (Loubota Panzou et *al.* 2016). Les premiers travaux sur la cartographie de la biomasse au Gabon sont réalisés à la Lopé par Mitchard et *al.* 2012 à partir du RADAR et du LiDAR. Cette étude révèle une incertitude de 25% entre la biomasse observée et la biomasse estimée. Les travaux de Mitchard et *al.* 2013, Langner et *al.* 2014 sont d'un apport dans les techniques et les méthodes de spatialisation de biomasse en général.

S'agissant des mangroves, les travaux d'estimation de biomasse remontent à la fin des années 70 avec Briggs (1977) et Christensen (1978). En effet, Briggs en 1977 amorce sur les études de biomasse en estimant la biomasse des communautés des mangroves en climat tempéré. Christensen (1978) quant à lui va évaluer la production de biomasse du *Rhizophora apiculata* au sud de la Thaïlande. Autour des années 80 les travaux sur les estimations de la biomasse et les équations allométriques se multiplient. Twilley (1985); Tamai et *al.* 1983; Woodroffe, 1985; Putz et Chan 1986; Komiyama et *al.* 1987, 1988 ; Clough et Scott, 1989. Au début des années 90, Seanger et Snedaker (1993) élaborent les premières équations allométriques pantropicale d'estimation de la biomasse des mangroves. Plusieurs équations ont été créées mais, elles demeurent monospécifiques. Ainsi, une nouvelle série d'équation dites générale émergent (Komiyama et *al.* 2005 pour l'Asie ; Chave et *al.* 2005 ; Komiyama 2008 pour l'Amérique). Toutefois, jusque-là, les travaux sur les équations allométriques et la biomasse sont tournés vers l'Amérique et l'Asie.

L'Afrique et l'Europe amorcent l'élaboration des équations allométriques des mangroves de leur territoire respectif au milieu des années 90 et autour des années 2000. En effet, Steinke et *al.* 1995 élaborent des équations allométriques pour les mangroves de l'estuaire du Mgeni en Afrique du Sud. Un an après c'est à Slim et *al.* 1996 d'estimer la biomasse de mangrove de la baie de Gazi au Kenya. Deux ans après, Fromard et *al.* 1998 mettent en place des équations allométriques spécifiques aux espèces *Rhizophora spp*, *Avicennia germinans* et *Laguncularia racemosa* pour les

mangroves de la Guyane Française. Ensuite, Kirui et *al.* (2006) renchérissent les estimations de la baie de Gazi en mettant en place des équations spécifiques aux genres *Ceriops* et *Rhizophora*.

Les mangroves de l’Afrique centrale ne sont pas en restes. En effet, Ajonina en 2008 élabore des équations allométriques spécifique pour les mangroves du Cameroun. Il fait également une équation générale pour le Benin (Ajonina et *al.* 2013). En 2014 cette équation est élargie pour les mangroves du Gabon, Congo et République Démocratique du Congo (Ajonina et *al.* 2014).

Les estimations cartographiques de biomasse des mangroves sont également mises en place. En effet, la première carte d’estimation de biomasse des mangroves par télédétection aéroportée fut élaborée par Tiwari et Singh, 1984. Ensuite, arriveront les travaux de Smith et *al.* 1998 qui mettent en place une méthodologie de d’évaluation de biomasse par télédétection aéroportée. Dans les années 2000 Simart et *al.* 2008, ensuite Fatoyinbo et *al.* (2008, 2012) font une spatialisation de la biomasse des mangroves du Mozambique puis de la biomasse des mangroves à l’échelle de l’Afrique à partir des hauteurs des mangroves. Un an après Hutchison et *al.* (2014) élabore la première carte de distribution du carbone des mangroves à l’échelle du globe à partir d’un modèle de prédiction qui prend en compte les variables climatiques. Castillo, 2017 quant à lui utilise Sentinel 1 (*Synthetic Aperture Radar (SAR)*) et les bandes multi-spectrales de Sentinel 2 pour la prédiction de la biomasse de mangroves en utilisant les indices de végétation. Pour le faire, Castillo (2017) s’est basé sur les régressions linéaires.

Pour ce qui est des mangroves du Gabon, les aspects essentiellement floristiques et structuraux des mangroves dans l’estuaire du Gabon ont été abordés par le passé (Villiers, 1973; Lebigre, 1983, 1990). Au Gabon les seules deux thèses de doctorat spécifique à la mangrove connues sont celles de Villiers (1973) dont seul l’article de synthèse reste disponible et celle de Lebigre (1990). La première est à cheval entre le Cameroun et le Gabon. La partie Gabonaise va de Cocobeach dans le Rio Mouni jusque dans la baie de la Mondah. Dans cette thèse Villiers (1973) accorde une place importante sur l’influence des variables physico-chimiques du milieu sur la mangrove. Il s’appuie sur la salinité, le pH, la pente et le sol pour comprendre la répartition des mangroves. Lebigre (1990) dont la thèse couvre les estuaires Komo, Mondah et Rio Mouni fait de même avec la particularité de comparer la répartition des mangroves du Gabon à celle de Madagascar. D’autres

auteurs tels que, Fromard et *al.*, 1994 ; Ondo Assoumou (2006); Rabenkogo (2007) ont fait également des recherches sur la question des mangroves dans la région du Delta de l'Ogooué et ses environnements lagunaires au sud. Les premiers ont fait un état de lieu des mangroves environnantes les sites pétroliers de Port-Gentil. Le deuxième s'est intéressé aux questions du mode de recrutement des individus, à la structure, aux indices écologiques de chaque espèce et aux inventaires taxonomiques. Le troisième s'est accentué sur les aspects cartographiques notamment des *Rhizophoras*, leur localisation parmi les forêts inondées de terre ferme. A cela, s'ajoute quelques contributions portant sur les impacts anthropiques sur les mangroves, la diversité floristique des mangroves, et la modélisation de la dynamique des mangroves périurbaine en 2030 (Ondo Assoumou, 2011, 2017; Edou et *al.*, 2011; Akendengué, 2016 ; Akendengué et *al.* 2018, Okanga et *al.* 2019).

Rares sont les études portant sur la biomasse et le carbone en milieu de mangrove au Gabon (Ajonina et *al.* 2014; Kauffman et *al.* 2017; Simard et *al.* 2019). L'étude faite par Ajonina et *al.* (2014), dans le cadre du programme REED+, se limite à la province de l'Estuaire du Gabon (Akanda et Cocobeach) où ont été établis des parcelles qui n'ont plus jamais été remesurées. Celle réalisée par Kauffman et *al.* (2017) prend en compte des mangroves au Parc Akanda, au complexe protégé de Gamba et du sud de Petit Loango. Celle menée par Simard et *al.* (2019) porte sur le Parc Pongara. Ainsi, pour combler ce déficit de littérature portant sur le carbone dans les mangroves du Gabon, nous avons pris ancrage sur des travaux portant sur des sites étrangers des auteurs tels que : Saenger et *al.* (1993) ; Kairo (2001) ; Chave et *al.* (2005), Comley et *al.* 2005 ; Komiyama et *al.* (2008) ; Ajonina (2008) ; Murdiyarso et *al.* (2009) ; Kauffman et *al.* (2011 ; 2017) ; Alongi (2012) ; Adame et *al.* (2016) ; Alongi et *al.* (2016).

2.2. Problème

L'espace littoral du pays est occupé à 61% par la population sur 18% du territoire national, avec 68% de citoyens uniquement sur Libreville et Port-Gentil (Pottier et *al.*, 2017). Or, selon nos estimations cet espace abrite également 3,34% de mangrove. Le taux de la population urbaine de Libreville est passé de 7% à 52% de la population nationale, entre 1960 et 2017 (Pottier et *al.*, 2017). La croissance de la population urbaine entraîne une augmentation des besoins en eau, en

énergie et en espace. De ce fait, l'absence de politique d'aménagement urbain et de statut juridique des mangroves favorise une occupation spontanée des zones de marais maritimes (Rue, 1998). Au fil du temps, les espaces naturels périurbains sont convertis en espace urbain. Cette pression démographique sur l'assiette foncière engendre la déforestation et le remblai des zones de mangrove. Dans plusieurs quartiers de Libreville (Haut de Gué-Gué, Belle-Vue, Oloumi, le long des rivières Ogombié et Lowé, etc.), la mangrove était présente en 1990. Celle-ci n'est plus que fragmentaire en 2020.

A priori inondables et donc zones *non aedificandi*, ces lieux nécessitent des grands moyens en termes d'aménagement. Lesquels moyens ne sont pas toujours détenus par les riverains. Ainsi, ils s'y installent avec des méthodes ou de procédés de fortune, au détriment de la mangrove et de leur propre condition de vie. Ce qui leur devient par la suite préjudiciable, ces zones étant naturellement inondables. Les quartiers Belle-Vue, Oloumi, Haut de Gué-Gué sont de parfaits exemples de zones inondables, où la présence des mangroves autrefois fut évoquée par Lebigre (1990).

L'une des particularités des villes littorales de la province de l'Estuaire est le fait qu'elles aient au moins une frontière naturelle constituée de mangrove. Cette configuration imposée par des frontières naturelles réduit les marges de manœuvre des possibilités d'extensions urbaines, qui ne sont pas toujours comprises par la population. Ainsi, le sort réservé aux mangroves devient préoccupant. C'est le cas de celles de Belle-vue et Awendjé, dont le Lebigre évoque la présence en 1983, dont aujourd'hui une relique est encore observable derrière le marché du B2. De même, celles du Pont Nomba, d'Alénakiri et Village Bakota, Mindoubé, Oloumi, Haut de Gué-Gué et Alibandeng, Belle-Air, Cap Caravane, Baie Akouango, Idolo, Bikélé et Cocobeach sont partiellement rasées par les riverains. Cette pratique de conversion de marais à mangrove en zone d'implantation d'habitations favorise la libération brusque du carbone inorganique et organique stocké au cours des temps géologiques.

Les rares données de carbone de mangroves, dont dispose le Gabon, résultent des actions ponctuelles élaborées par des chercheurs extérieurs : Ajonina et *al.* (2014), Kauffman et *al.* (2017) et Simard et *al.* (2019) dans le cadre respectif du REED+, du Carbone bleu et de la mission NASA. Il en ressort que le Gabon et le Libéria occupent la première place dans le classement de stock de

carbone des mangroves de la côte ouest africaine (Kauffman et *al.*, 2017). Dans un contexte où les scénarios envisagés pour la réduction des gaz à effet de serre (GES) sont entre autres la création d'une bourse carbone, il est gênant que le monopole d'estimation et de spatialisation de ladite donnée dans les mangroves soit l'apanage d'une expertise extérieure. Le Gabon dispose de la plus grande diversité floristique des mangroves dans la sous-région [(Congo et République Démocratique du Congo, 2 espèces; Cameroun, 5 espèces; Gabon, 8 espèces), Ajonina et *al.* (2014)] et des mangroves le plus hautes du monde (Simard et *al.*, 2019). Le pays a perdu 0,036% de ses mangroves, soit 55 km² en 26 ans entre 1980 et 2006 ; et 0,022%, soit 34 km² en 10 ans entre 2000 et 2010 (Ajonina et *al.*, 2014 et 2016). Le constat est que plus le temps passe, plus la vitesse de dégradation des mangroves s'accroît.

Eu égard à ce qui précède, des problèmes se posent sur l'espèce et l'estuaire qui détiendraient le plus de biomasse et de carbone aérien, mais aussi sur les outils nécessaires à leur évaluation. A cela, s'ajoute celui de la répartition spatiale de ladite biomasse et dudit carbone. De plus, les équations les plus utilisées sont celles de Fromard et *al.* (1998) pour la Guyane Française et Komiyama et *al.* (2005) pour l'Asie. Or, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) préconise l'utilisation des équations spécifiques et locales en mettant l'accent sur la spatialisation. De plus, des équations spécifiques se justifient dans un pays où les mangroves ont respectivement des DBH maximum et hauteur maximum de 127 cm et 24 m pour *Avicennia*, ou 76 cm et 53 m pour *Rhizophora* selon notre échantillon. Les équations couramment utilisées, dont le DBH maximal ne dépasse pas 50 cm, ne répondent pas aux exigences dendrométriques des mangroves de l'Afrique centrale en général et du Gabon en particulier, du moins des mangroves estuariennes.

Ainsi :

- quelles sont les équations allométriques capables d'estimer la biomasse aérienne et le stock de carbone aérien des mangroves estuariennes du Gabon ?
- quels sont les outils qui permettent d'estimer la biomasse et le carbone aérien des mangroves dans une grande étendue spatiale ?
- quelle est l'espèce, dans la mangrove et l'estuaire, qui regorgent le plus de biomasse et de carbone aérien?
- quels sont les paramètres environnementaux, qui expliquent la répartition spatiale du stock de biomasse et carbone aérien dans les mangroves des estuaires au Gabon ?

2.3. Objectifs

L'objectif général de ce travail était d'estimer et spatialiser la biomasse aérienne et le stock de carbone aérien des mangroves estuariennes au Gabon. Il visait aussi à montrer le rôle des outils de la géographie dans l'estimation et la spatialisation de la biomasse aérienne et du stock de carbone aérien des mangroves. Le but était également de montrer la variabilité spatiale de biomasse aérienne et du stock de carbone aérien des mangroves, ainsi que les facteurs de cette variabilité.

De manière significative, ce travail se résume en quatre objectifs spécifiques que sont :

- mettre en place des équations allométriques locales pour l'estimation de la biomasse aérienne et du stock de carbone aérien des mangroves estuariennes;
- combiner les données de terrain et la télédétection pour estimer la biomasse aérienne et le stock de carbone aérien des mangroves estuariennes par télédétection ;
- déterminer l'espèce de mangrove et l'estuaire qui stockent le plus de biomasse et de carbone ;
- déterminer les variables environnementales, qui régissent la répartition spatiale de la biomasse aérienne et de carbone aérien dans les mangroves estuariennes.

2.4. Hypothèses

Ce travail repose sur quatre hypothèses ci-après.

- *primo*, des équations allométriques spécifiques locales au sol permettent de mieux estimer la biomasse et le stock de carbone aérien des mangroves estuariennes par rapport aux équations générales de Guyane Française (Fromard et *al.*, 1998) et d'Asie (Komiyama et *al.*, 2008) couramment utilisées ;
- la combinaison d'une variable de télédétection aux données de terrain permet d'estimer la biomasse et le stock de carbone aérien des mangroves estuariennes de grandes étendues spatiales ;
- l'espèce *Rhizophora racemosa* et l'estuaire du Komo stockent le plus de biomasse aérienne et de carbone aérien ;

- l'altitude, le pH, la salinité, la température, l'oxygène dissous, la pression atmosphérique et la conductivité ont une influence sur la répartition spatiale de la biomasse aérienne et du stock de carbone aérien des mangroves estuariennes.

3. Approche théorique et méthodologique

3.1. Cadre conceptuel

a) Estimation

Le concept d'estimation varie d'un domaine à un autre. En effet, selon le dictionnaire *le Petit Robert*, l'estimation est l'action de déterminer la valeur de quelque chose ou, aussi, d'évaluer la grandeur ou l'importance d'un objet. En mathématique, l'estimation est une opération statistique consistant à déterminer les paramètres relatifs à une population à partir d'un échantillon. Dans le domaine de la géostatistique, l'estimation est le fait de rechercher la valeur globale ou locale d'une variable régionalisée; c'est l'équivalent d'une prédiction, d'une évaluation et calcul en statistique. Pour cette étude, l'estimation est restée calée au sens mathématique du concept.

b) Spatialisation

Dans les dictionnaires Larousse, Le Petit Robert, le mot spatialisation n'existe pas, mais plutôt spatial qui désigne ce « *qui est du domaine de l'espace* » ; ce qui est « *relatif à l'espace interplanétaire* ». Aucune référence à la géographie n'est évoquée. Cela n'est pas étonnant, à partir du moment où ce concept de spatialisation est également absent des dictionnaires de géographie de Monkhouse (1965), George (1970), Lacoste, (2003), Brand et *al.* (2005). Dans Lévy et *al.* (2003), par contre, « spatialité » signifie caractéristique de la dimension spatiale d'une réalité sociale. Par ailleurs, en décomposant le mot spatialisation nous obtenons deux expressions : d'une part « *spatialis* » du latin *spatium*, qui veut dire espace constituant le radical du verbe spatialiser et, d'autre part, « ation » du latin « *atio* » qui signifie marquer l'action de. Alors, la spatialisation est l'action de spatialiser. Toutefois, cette action de spatialiser varie d'un domaine à un autre. En astronautique, spatialiser veut dire envoyer dans l'espace dans le sens de mettre en orbite. Dans le dictionnaire Universalis, la spatialisation est évoquée dans deux domaines : en psychologie et en astronautique dont la définition avait déjà été évoquée par le Petit Robert. Pour le psychologue, la spatialisation est « *l'action de localiser dans l'espace un stimulus visuel ou auditif* ». En géographie, par contre, la spatialisation consiste à envisager l'étude d'un phénomène sous l'angle de son

rapport à l'espace. L'espace étant ici entendu comme l'espace géographique (soit l'étendue), et non comme l'espace en tant que partie de l'univers située au-delà de l'atmosphère.

c) Aliquote

L'aliquote est une «*partie extraite d'un compartiment de l'arbre, dont la mesure permet de mesurer l'ensemble du compartiment par règle de trois* » (Picard, 2012). En biologie, c'est l'équivalent du tissu organique prélevé pour déterminer le code génétique d'un individu. Ici l'aliquote est prélevé pour déterminer l'infradensité de l'individu, afin d'aboutir à l'infradensité de toute une espèce de mangrove : *Avicennia germinans*, *Rhizophora racemosa*, *Rhizophora harrisonii*, *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* et *Conocarpus erectus*.

▪ Biomasse aérienne (*Aboveground Biomass* (AGB))

Déraciner chaque arbre dans une parcelle, le compartimer (racine, tige et feuille), le découper en rondelle afin d'en estimer sa masse et son volume, et déterminer son infradensité ne sont pas une tâche facile. En effet, une telle initiative nécessite des grands moyens financiers, matériels, humains et demande un temps considérable; sans oublier les dommages qu'une telle pratique pourrait avoir sur l'environnement et sur les changements climatiques (Picard et *al.*, 2012). Cela est d'autant plus défavorable pour une forêt de mangrove, dans un contexte où elle représente un des plus grands bassins de carbone de la planète (Donato et *al.*, 2011 ; Kauffman et *al.*, 2011 ; Alongi, 2012 ; Mitra et *al.*, 2014).

Pour toute ces raisons, nous avons opté pour la méthode dite non destructive, celle basée sur l'utilisation des équations allométriques destinée à la biomasse de la partie aérienne (*Aboveground Biomass*, AGB)). Or, ces équations allométriques ne sont pas encore disponibles pour la mangrove du Gabon. Les études précédemment évoquées sur les mangroves du Gabon, hormis celle d'Ajonina et *al.* (2014), ont utilisé les équations de Fromard et *al.* (1998) et Komiyama et *al.* (2008).

La mise en place d'une équation allométrique nécessite d'avoir l'infradensité du bois de chaque espèce. Pour ce faire, nous avons prélevé un aliquote de chaque individu au niveau du tronc

et de la racine, afin d'en déterminer l'infradensité de chaque espèce de mangrove en laboratoire. Ainsi, nous avons obtenu l'infradensité des genres *Rhizophora* et *Avicennia*, qui est un paramètre essentiel dans la mise en place d'une équation allométrique.

- Méthode géostatistique

La méthode géostatistique renvoie à la variabilité spatiale quantitative d'une variable en tout point de l'espace. Nous faisons usage de la méthode de calcul de volume à partir du DBH et la hauteur pour aboutir à des régressions prédictives de biomasse aérienne et de carbone aériens et, par ricochet, de dioxyde de carbone des forêts de mangrove (Husch et *al.*, 2003 ; Ajonina, 2008). De même, nous effectuons une régression entre l'altitude topographique dérivée du SRTM et la hauteur des mangroves mesurée sur le terrain, pour obtenir un modèle de prédiction de hauteur de mangrove à partir du SRTM. Le modèle est validé grâce aux données LiDAR issues de la campagne Afrisar. Le mode opératoire consiste à comparer les prédictions du modèle aux hauteurs obtenues par le Lidar. Ensuite, avec les hauteurs obtenues des mangroves à partir du modèle de hauteurs issues du SRTM, nous procédons à la mise en place d'un modèle de prédiction de biomasse. Alors, est obtenu un modèle de prédiction de biomasse par télédétection aéroportées (RADAR (SRTM)). Ainsi, avec les modèles de biomasse obtenue, nous sommes capables de prédire la biomasse dans un géofaciès de mangroves des estuaires du Komo, de la Mondah et du Rio Mouni. Aussi, les facteurs de répartition spatiale sont-ils élaborés à partir des analyses multidimensionnelles et multivariées établies avec des matrices spatiales de paramètres physico-chimiques (Legendre et Legendre, 1998 ; Anderson, 2006).

3.2. Cadre théorique

- ✓ Recherche documentaire

Le recensement des écrits a consisté à inventorier les ressources documentaires en rapport avec les écosystèmes de mangroves en général, celles du Gabon, et en particulier celles des estuaires du Komo, de la Mondah et du Rio Mouni. Nous avons obtenu les cartes topographiques de Libreville et ses environs au 1/200 000 et au 1/20 000 de 2005 à l'Institut National de Cartographie (INC). Dans les bibliothèques de l'Institut Français du Gabon, de l'École Nationale des Eaux et

Forêts (ENEF), de l'Université Omar Bongo (UOB), des Archives Nationales du Gabon et du *Cameroon Wildlife Conservation Society* (CWCS) à Mouanko au Cameroun, nous avons consulté plusieurs articles, ouvrages généraux et spécifiques relatifs aux questions de prédictions et spatialisations de la biomasse.

Dans la bibliothèque du CWCS, nous avons découvert la documentation relative à la biométrie forestière, notamment l'ouvrage de Bertram Husch et *al.* (2003). Cet ouvrage détaille, avec simplicité, la mise en place d'une équation allométrique. Dans cette même bibliothèque à Mouanko, nous avons également eu accès à plusieurs numéros de la revue *Forestry Association of Nigeria* (FAN), qui nous a été utile dans l'élaboration des modèles de distribution. Lesquels modèles ont permis de déterminer laquelle des mangroves urbaines est conservée ou non, en fonction son degré de maturité.

✓ **Mathématique et géographie : une relation qui date de l'Antiquité**

La présence des mathématiques en géographie ne date pas du 21^{ème} siècle. En effet, le mot « géographie » est employé pour la toute première fois dans l'Antiquité gréco-romaine par celui que beaucoup présentent comme un mathématicien et astronome : Ératosthène de Cyrène (276-194 avant J.-C.). Et l'une des premières prédictions mathématiques en géographie fut élaborée par Claude Ptolémée (100-168 après J.-C.), qui fit des calculs de prévision des événements astronomiques et mit en place la première projection cartographique. Cette mathématisation de la géographie est encore marquée, à la fin du 16^{ème} siècle et au début du 17^{ème} siècle, dans les écoles de géographie belges et allemandes avec Kremer dit Mercator et Varnuis, pour qui la géographie est perçue comme « *une branche des mathématiques qui étudie la terre dans sa forme, son volume et son mouvement* ». En parallèle, les mathématiciens des 18^{ème} et 19^{ème} siècles travaillaient sur les questions de géographie, au point de mettre en place ce qu'ils ont appelé « *la théorie mathématique des cartes géographiques* », dont quelques grandes figures sont : Lambert, Gauss, Bonnet. Au cours du 20^{ème} siècle, les géographes anglo-saxons poursuivront cette œuvre avec la mise en place d'une géographie quantitative impulsée de l'université de l'Etat de Washington à Seattle aux Etats-

Unis, avec notamment : Peter Haggett, *Locational analysis in human geography* (1965), Goodchild (2008), William Bunge, *Theoretical Geography* (1962) et David Harvey, *Explanation in geography* (1969), Beajeu-Garnier, 1971.

En France, l'usage des mathématiques en géographie est vulgarisé par plusieurs auteurs. D'après Beaujeu-Garnier (1975) et Cauvin (2007), citons : Péguy (1948, *Introduction à l'emploi des méthodes statistiques en géographie physique* ; 1957, *Eléments de statistique appliquée aux sciences géographiques*), Rossier (1953, *Géographie mathématique*), Racine et Raymond (1973, *L'analyse quantitative en géographie*), le Groupe Chadule (1974, *Initiation aux méthodes statistiques en géographie*), Dans les années 80, Dauphiné et Canicio (1988) font la promotion en France de l'usage de la géostatistique en géographie, à travers l'ouvrage : *Variogramme et structures spatiales*. Il en est de même de Sanders (1989, *L'analyse des données appliquée à la géographie* et 1995, *Géographie et statistique*). Aujourd'hui, avec le perfectionnement de l'outil informatique, les mathématiques en géographie ne sont plus seulement limitées dans la description et la prédiction. Elles sont devenues multidimensionnelles et multivariées capables d'expliquer les causes, les ressemblances, les liens espèces-milieus et la répartition des espèces. Il est question de méthode d'analyse canonique de redondance, pour définir l'influence des éléments spatiaux ou environnementaux géo-localisés sur une ou plusieurs variables d'intérêt (Dufrêne, 1992 ; Legendre et Legendre, 1998).

Les questions de biomasse en géographie ont été introduites par l'école russe, dont l'une des figures est Viktor Borisovich Sochava. En effet, dans sa théorie de géosystème élaborée en 1960, le concept de biomasse longtemps utilisé en biologie, foresterie et écologie sera déconstruit et reconstruit, puis placé au centre des préoccupations des géographes. De ce fait, Sochava part du constat selon lequel la biomasse ne prenait pas en compte la répartition verticale encore moins horizontale, c'est-à-dire les variations de la structure spatiale en deux dimensions d'un écosystème.

Ainsi, dans sa station de recherche de Martkopi (Caucase) en ex URSS, V. B. Sochava forge en 1960 le concept de géosystème auquel sont adjointes trois composantes : biotique, abiotique et anthropique. Ainsi, il déconstruit le terme biomasse qu'il trouve biocentrique pour le reconstruire en phytomasse pour la biomasse végétale, zoomasse pour la biomasse animale, minéralomasse

pour les organismes vivant dans les roches. Il désigne le géosystème comme étant un « *système géographique naturel homogène lié à un territoire* ». Il le caractérise par une structure spatiale verticale (géohorizon) et horizontale (géofaciès), qui intègre un fonctionnement et un mouvement (Sochava, 1972 ; Beroutchachvili et Bertrand, 1978). Il va tenir compte, à la fois, des aspects quantitatifs et qualitatifs.

En cela le présent travail, qui est d'estimer, de spatialiser et déterminer les facteurs de répartition de biomasse et carbone de forêt des mangroves, n'est pas étranger à la géographie physique et singulièrement à la biogéographie. Il est question d'étudier ici la répartition spatiale à la fois verticale et horizontale (géohorizon et géofaciès) de la biomasse des mangroves, ainsi que son mouvement à travers les facteurs de répartition. En restant puriste et fidèle à la théorie du géosystème, l'intitulé de ce travail devient « *Étude de la phytomasse aérienne et du stock de carbone d'un géosystème des mangroves estuariennes au Gabon* ». Et, ceci, partant du fait que le géosystème intègre les aspects de quantification et de spatialisation (Beroutchachvili et Radvanyi, 1978).

3.3. Cadre méthodologique

Les sites d'échantillonnage ont été choisis de manière aléatoire. À partir d'une boussole de précision, un transect de 100 m est établi avec une placette circulaire de 154 m² tous les 20 mètres. Les variables physico-chimiques de placette, ainsi que des variables dendrométriques et géographiques de chaque arbre y ont été prélevés. Les outils respectifs liés à cette collecte sont la sonde multiparamètre, le mètre forestier, l'altimètre laser, le GPS (*Global Positioning System*).

Les cartes topographiques ont été géoréférencées (processus permettant d'établir une relation entre les entités affichées dans un système d'information géographique et leur position dans le monde réel) avec le logiciel *Quantum Geographic Information System* (QGIS). Aussi, QGIS a servi dans la réalisation du plan d'échantillonnage. Le tableur *Excel* a servi dans la réalisation des fiches de collecte et à la saisie des données.

Les données ont été analysées suivant deux canevas :

- l'un géostatistique, par l'entremise du logiciel **R 3.4.3** ; notamment les packages: **ggplot2** pour la présentation de données, **lme4** pour les régressions, **metrics** pour la validation des modèles et **factominer**, **ade4** et **vegan** pour les analyses multidimensionnelles et multivariées;
- l'autre cartographique, à travers les logiciels *System for Automated Geoscientific Analysis* (SAGA), *Quantum Geographic Information System* (QGIS), et avec les packages **rgdal**, **raster** et **rldir** du logiciel R; avec les outils *raster calculator* SAGA, QGIS et la console de R, nous avons réalisé le calcul des indices de végétation et implémenté les différents modèles d'estimation de biomasse et de carbone obtenu.

3.4. Difficultés rencontrées

Les difficultés ont été multiples. Mais, la plus importante a été celle de l'identification d'un laboratoire spécialisé, hors du Gabon, et présent sur le continent ou en Europe plus proche. Celui-ci devait disposer d'un agrément à recevoir des échantillons de sols tropicaux. À côté de cela, un autre énorme handicap s'est posé avec les coûts exorbitants des analyses des échantillons de sols pourtant prélevés et stockés en partie. Il fallait prendre en compte les frais de déplacements et de séjour à l'étranger et d'accompagnement dans le laboratoire d'accueil. Tous ces obstacles, entre autres, nous ont amené à axer le travail uniquement sur la biomasse aérienne (AGB). De plus, les sorties de terrain ont été ponctuées par de longues heures d'attente en rade, une fois de 15 h à 24 h lié aux marées et à l'envasement avec une navigation interdite de nuit, des pannes de matériels (multiparamètres, carottier), sans oublier les crevaisons de pneu sur les routes non bitumées et dégradées de la province de l'Estuaire. Je terminerai en rappelant que travailler dans les mangroves, entre racines échasses, mangroves naines et vases, est une véritable odyssée. Malgré toutes ses péripéties, et la pénibilité du travail de terrain, l'œuvre a été menée à son terme avec passion.

3.5. Annonce du plan

Le travail s'articule en trois parties, dont chacune comportent deux chapitres. D'abord, la première partie traite du « Cadre physique et méthodes ». Le premier chapitre, qui plante le décor, aborde successivement le cadre physique et les généralités. Le second chapitre retrace le parcours

méthodologique de la recherche entreprise, depuis la collecte de données et leurs analyses, la méthode d'estimation de la biomasse par télédétection jusqu'aux modèles de distribution de DBH, en passant par le processus de mise en place des équations allométriques de prédiction de la biomasse au sol.

Ensuite, la deuxième partie porte sur la « Modélisation et la spatialisation de la biomasse et de carbone par télédétection ». Le premier chapitre de cette partie est axé sur la mise en place des équations allométriques de prédiction au sol. Il présente les résultats de la modélisation de la prédiction des volumes, ainsi que les modèles de prédiction de biomasse et de carbone de mangrove sur la base d'un échantillonnage de terrain. Le second chapitre de cette partie examine, tour à tour, la prédiction de la biomasse de mangrove par télédétection optique à travers les indices de végétation, et par la télédétection radar à partir d'un modèle de prédiction de hauteur de mangrove issue du SRTM.

Enfin, la troisième partie analyse les « Facteurs de distribution spatiale ». Le premier chapitre porte sur les modèles de distribution de DBH. Il s'articule autour d'un modèle d'ensemble pour les trois estuaires, et sur la mise place de modèle pour chaque site. Le second chapitre, quant à lui, fait état des facteurs de distribution. Il présente l'environnement physico-chimique des mangroves, tout en montrant son organisation biogéographique, avant de déboucher sur l'organisation de stock de biomasse aérien.

Partie I: CADRE PHYSIQUE ET METHODES

Les capacités de stockage de la biomasse et du carbone des mangroves sont dépendantes du milieu. Ainsi, une description dudit milieu et de ladite mangrove s'impose. D'une part, cela permettra d'isoler lesquels des facteurs interagissent entre eux. D'autre part, les éléments de la description permettront de faire des corrélations entre les facteurs du milieu et les stocks de biomasse et de carbone.

En bref, cette partie est constituée de deux chapitres. Le premier porte sur les aspects physiques et les généralités sur la mangrove, la biomasse et le carbone. Aussi, seront l'un après l'autre analysés les éléments de la topographie, de l'hydrographie, des marées, du climat, du substrat rocheux, des sols, de la végétation, des activités anthropiques, ainsi que de la paléologie, dans les mangroves.

De fait, l'opportunité est donnée de présenter la mangrove, ses capacités de stockage de biomasse aérienne (AGB) et souterraine (BGB) et ses particularités de stockage par rapport aux autres écosystèmes forestiers. Les aspects du carbone, sous ses trois formes que sont le carbone inorganique (CI), le carbone organique (CO) et le dioxyde de carbone (CO₂), y sont abordés. On retrouve également la perception des études de carbone en trois dimensions à travers la notion de géosystème, qui se traduit par le géohorizon et le géofaciès chers aux géographes.

Le second chapitre de cette première partie porte sur les méthodes de l'étude. Il y va de la collecte des données, à la détermination des infradensités du bois de chaque espèce. Les méthodes de mise en place, d'équation allométrique d'estimation de hauteur et de biomasse au sol, y sont mises en exergue. Il en est de même des équations allométriques d'estimation de hauteur de biomasse par télédétection. Les modèles de distribution de DBH, outil indispensable dans l'aménagement forestier, y sont évoqués.

CHAPITRE I : Aspects physiques et généralités

La connaissance du milieu physique et anthropique est indispensable pour la compréhension de son mécanisme de fonctionnement. Ainsi, les aspects physiques du milieu, les généralités sur les mangroves, les particularités de stockage des mangroves et le carbone sous ses trois formes y sont présentés.

1. Les aspects physiques de la zone d'étude

1.1 Orographie

Libreville et sa région font partie du nord du bassin sédimentaire côtier gabonais, dont la largeur varie de 50 km aux environs de Cocobeach à 90 km aux environs de Libreville (Mombo, 1991). Cette région correspond aux estuaires du Rio Mouni, de la Mondah et du Komo et s'étend sur 610 km de rives estuariennes (Pottier et *al.*, 2017).

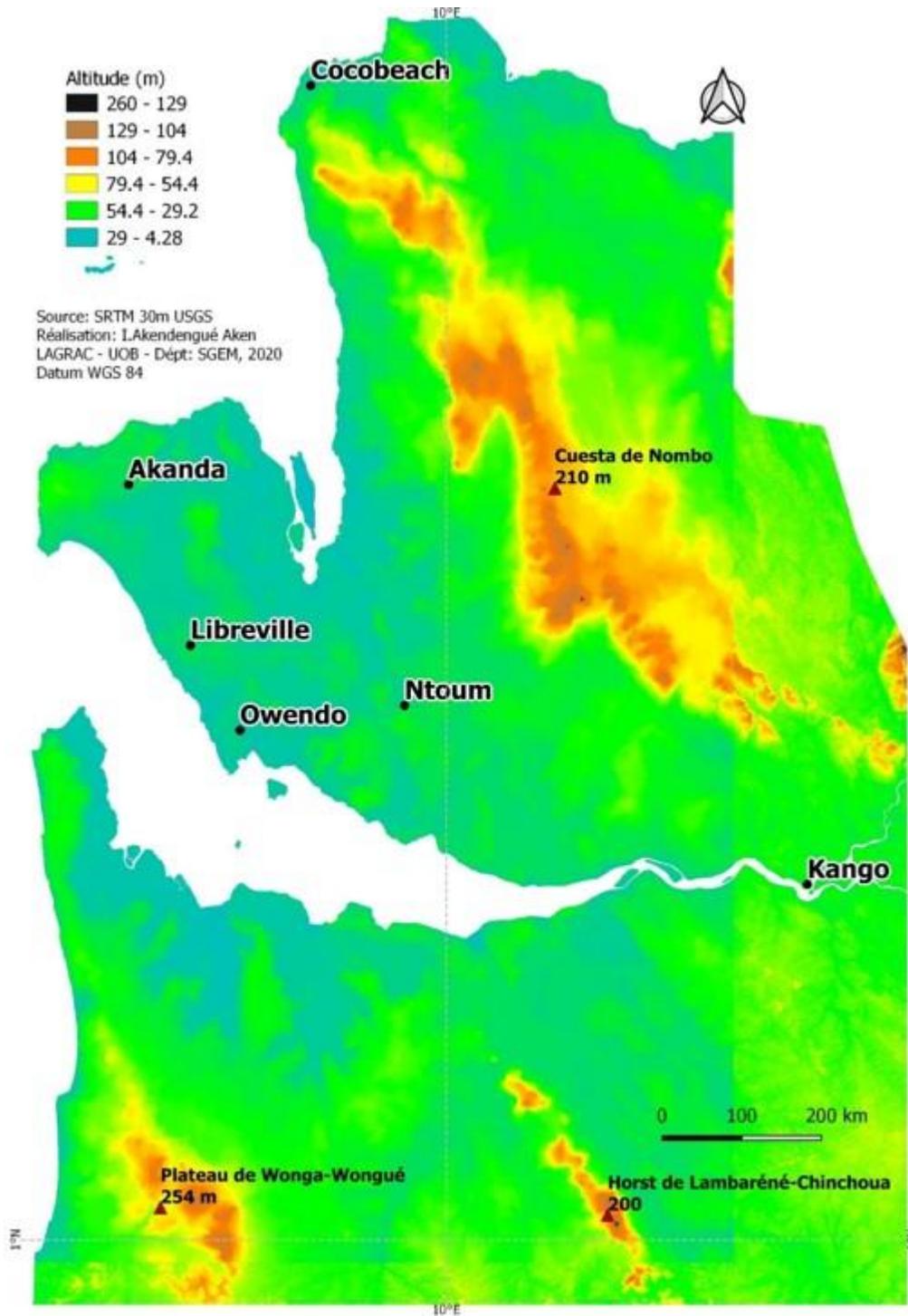
L'ensemble orographique est constitué de trois niveaux étagés, soit d'Est en ouest ou du continent vers le littoral :

- le premier niveau est entre 200 m et 225 m, l'ensemble le plus représentatif étant le plateau des grès de Ndombo culminant à 210 m au Mont Koulounga ;
- le deuxième niveau de plateau disséqué est entre 100 m et 125 m, représenté par les vestiges que sont les monts Bouet, Nkol-Ngoum et Bisségué ;
- le troisième niveau est un relief de dissection fluviale, qui a donné le système collinaire de Libreville et ses environs immédiats, dont l'altitude moyenne avoisine les 50 m.

La monotonie est interrompue dans les environs de Libreville par deux lignes de crêtes, d'orientation NNW- SSE, burinées par un long processus d'érosion. La plus importante des deux a 150 m d'altitude maximale, à l'Ouest de la localité de Ntoum et allant de la Baie de la Mondah à Donguila dans le fond de l'estuaire du Komo. La deuxième ligne de crête passe par les altitudes maximales culminant au Mont Bouet (126 m), le Mont Nkol-Ogoum (126 m) et le Mont Bisségué (104 m). Le « système de petites crêtes à flancs convexes » (Mombo, 2017), dont les collines

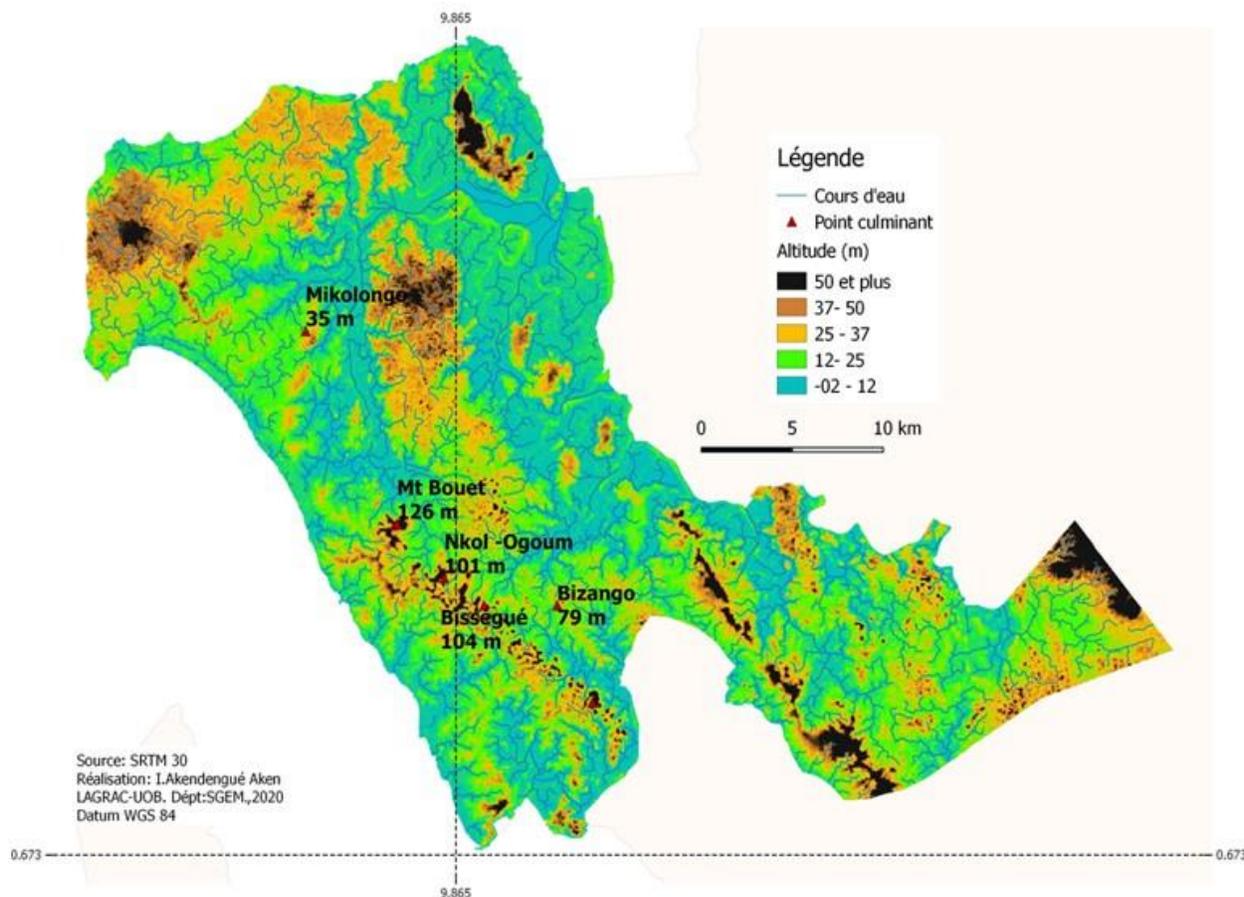
marquent le relief de Libreville, laisse transparaître une topographie qui a été le théâtre d'un long processus d'érosion hydrique (Cartes 2 et 3, ci-après).

Carte 2 : Les reliefs des régions littorales estuariennes du Gabon



Grosso modo, d'orientation générale NNO-SSE et parallèles aux Monts de Cristal dans l'arrière-pays, les grands reliefs de la région sont du Sud au Nord: le Plateau de Wonga-Wongué, le horst de Lambaréné-Chinchoua, en passant par les monts librevillois, et le Plateau de Ndombo.

Carte 3 : Relief de l'agglomération de Libreville



L'agglomération urbaine Akanda-Libreville-Owendo est dominée par un alignement collinaire d'orientation NNO-SSE ; le point culminant de cet ensemble orographique étant le Mont Bouet (126 m). Les pentes sont faibles (7 %) sur les collines et moyennes entre 10% et 15% dans l'amorce du plateau (Mombo, 1991). Les zones basses, dont l'altitude moyenne environnante est de 40 m, constituent le réceptacle de la mangrove. D'une manière générale, l'ensemble des estuaires est pris en étau par trois unités de relief. En effet le Rio Mouni est enserré par les Monts et Cristal à l'Est et la retombée Nord du plateau sur grès de Ndombo. L'estuaire de la Mondah est pris en tenaille entre la cuesta de Ndombo à l'Est et l'alignement collinaire Mikolongo, Mont Bouet, Nkol-Ogoum, Bissegué et Baudin à l'Ouest. Enfin, La rive droite de l'estuaire du Komo

est prise en étreinte entre le précédent ensemble allant des Monts Mikolongo au Mont Baudin à l'Est et le horst de Lambaréné-Chinchoua à l'Ouest. La rive gauche du Komo est prise en étau à l'Est par le horst de Lambaréné-Chinchoua et à l'Ouest par les plateaux de Wonga-Wongué.

1.2 Fleuves et rivières dans les estuaires du Komo, de la Mondah et du Rio Mouni

Mombo J. B. (2011) note que : « Les mangroves des marais maritimes (Tableau 1, ci-après) constituent le plus vaste ensemble végétal des zones humides côtières du Gabon. Elles sont dominent aux abords des étendues d'eaux saumâtres : estuaires, baies et lagunes marécageuses, complexe deltaïque de l'Ogooué et au niveau de certains lacs. Les marais maritimes à mangroves représentent au total 1,5 % de la superficie du territoire gabonais; soit 3 950 km² de superficie selon Rabenkogo N. (1998). Les mangroves des littoraux du Gabon font 29,1% sur le littoral Nord (Estuaires du Rio Mouni, de la Baie de la Mondah et du Komo), et 70,7% sur le littoral Sud *lato sensu* (delta Ogooué et Cap Lopez et grandes lagunes méridionales).»

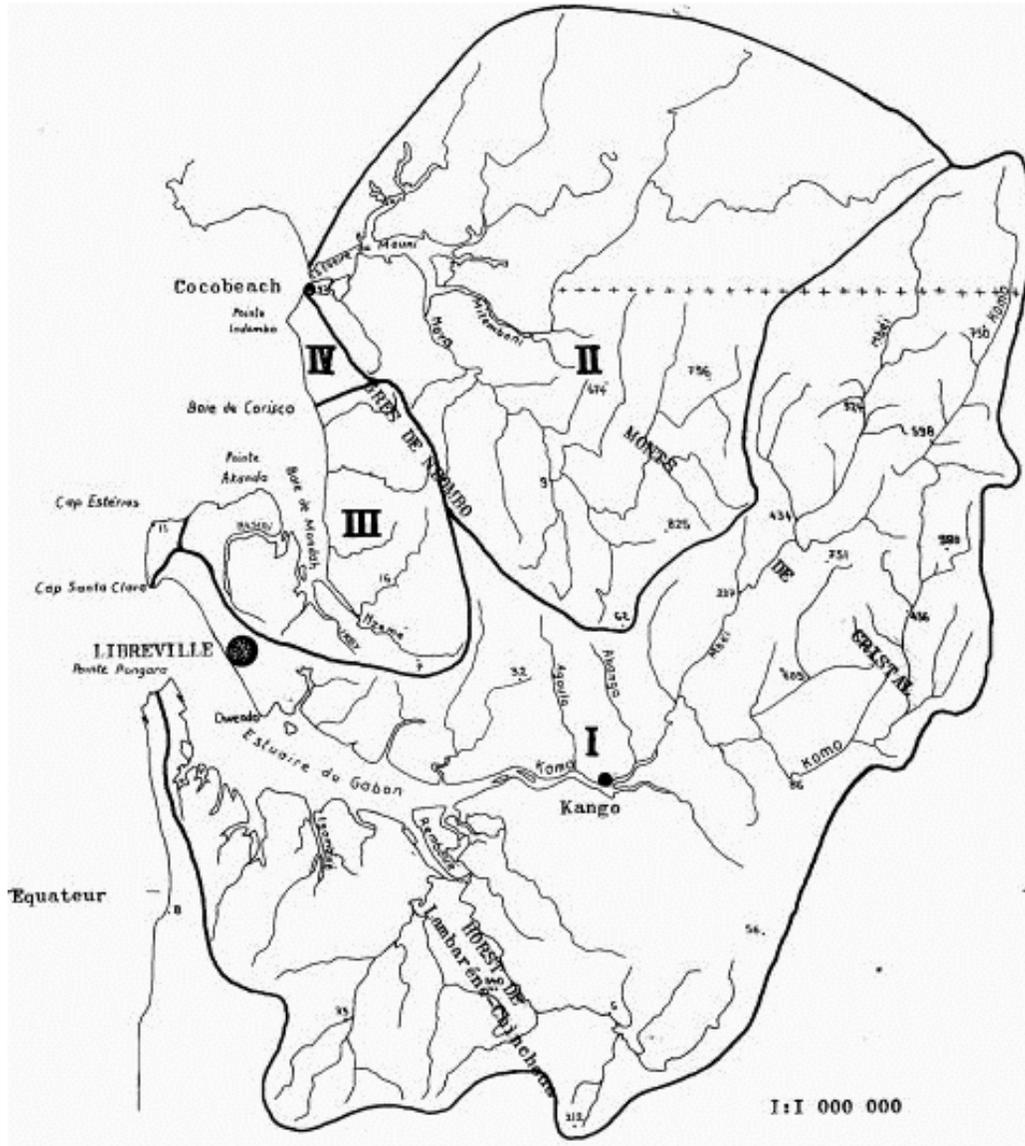
Tableau 1 : Les marais maritimes à mangroves du Gabon

REGION LITTORALE	NOM DU SITE	SUPERFICIE			FAO	
		<i>Lebigre J.-M. (1990)</i>	<i>Rabenkogo N. (1998)</i>		2000	2010
Littoral Nord	Estuaire du Rio Mouni /Mouni (rive gabonaise)	9 000 ha / 90 km ²	150 km ²	1 150 km ²	3,8	
	Baie de la Mondah	35 000 ha / 340 km ²	250 km ²		6,3	
	Estuaire du Komo / Gabon	100 000 ha/ 1 000 km ²	750 km ²	19		
Littoral central	Delta maritime de l'Ogooué	100 000 ha/ 1 000 km ²				
	Delta maritime de l'Ogooué et Baie du Cap Lopez		2 100 km ²	2 800 km ²	53	
Littoral Sud	Grandes lagunes méridionales: Fernan-Vaz Iguéla, Ndogo, Banio		700 km ²		17,7	
TOTAUX		244 000 ha / 2 500 km²	395 000 ha / 3 950 km²	99,8	115 000 ha	103 725 ha

Réalisation : Mombo J. B. (communication personnelle); d'après les données de Lebigre J.-M. (1990), Rabenkogo N. (1998) et Dossiers FAO (2002).

La région d'étude est drainée par un ensemble de quatre principaux bassins versants constitués par les estuaires du Komo, de la Mondah, du Rio Mouni et des petits cours d'eau côtiers (Carte 4, ci-après).

Carte 4 : Bassins versants des cours d'eau des estuaires de la Noya, de la Baie de la Mondah et du Komo



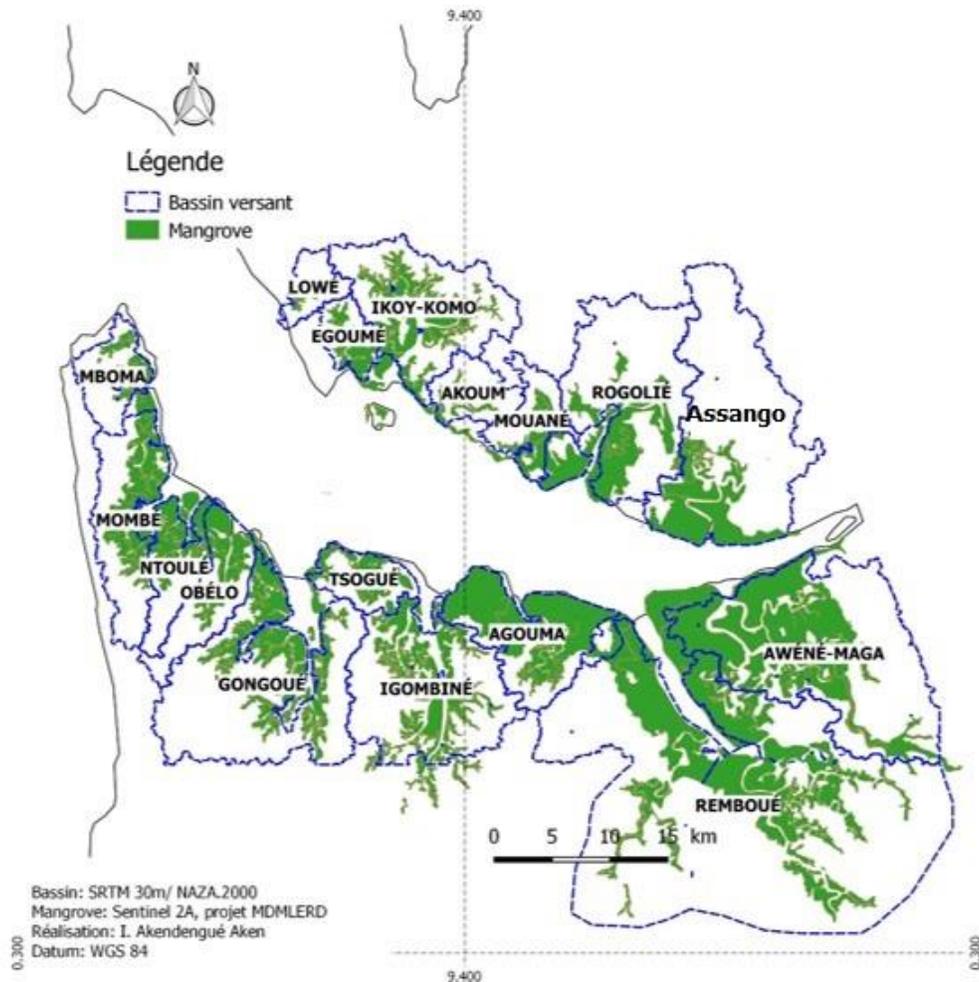
Source : Mombo, 1991.

I : Bassin versant du fleuve Komo ; **II** : Bassin versant du fleuve Noya (et du Mitemboni, en Guinée Equatoriale) ; **III** : Bassin versant de la Mondah ; **IV** : Petits cours d'eau côtiers.

1.3 Estuaire du fleuve Komo

Le Komo constitue un bassin-versant de 5000 km² avec un module brut de 160 m³/s. Parmi ses multiples affluents, les plus importants sont la Mbéi et la Remboué (Lasserre 1958 ; cité par Mombo, 1991). Le Komo prend sa source dans les Monts de Cristal. Sa couverture de mangrove est évaluée à 1000 km² (Lebigre, 1990 ; Ondo Assoumou, 2017), (Carte 5, ci-après).

Carte 5 : Bassins versants du Komo et ses principaux affluents



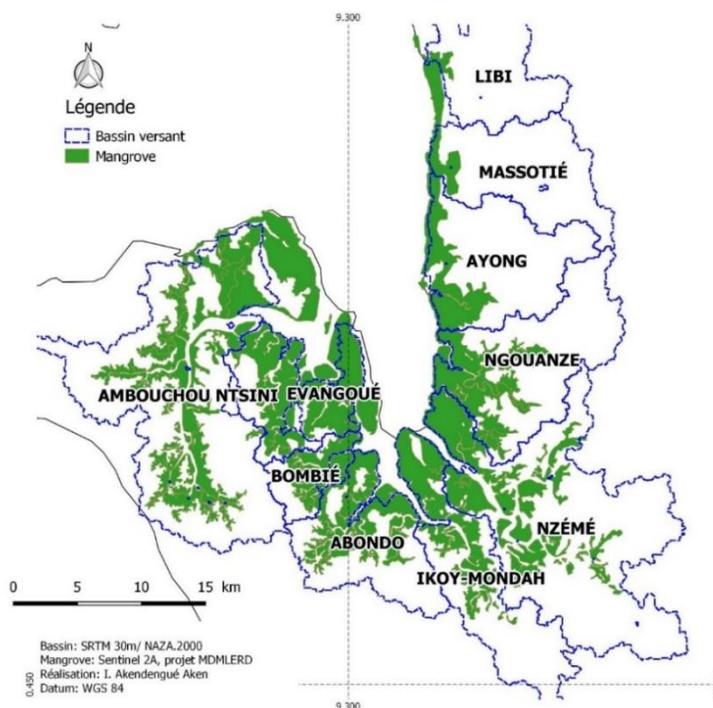
Au total, les mangroves de l'estuaire du Komo sont tributaires de 19 principaux sous bassins-versants. Sur la rive droite de l'aval vers l'amont, il y'a le sous bassin-versant de la Lowé colonisé par une espèce de mangrove endémique : le *Rhizophora mangle* (Lebigre, 1990). Ensuite, viennent les sous bassins-versants d'Egoumé, Ikoy-Komo, Akoum, Mouané, Rogolié et, enfin, le sous bassin-versant d'Assango. Si l'ensemble du bassin-versant est dominé par des faciès de *Rhizophora*, les sous bassins-versants Egoumé (rive droite), Rogolié et Assango sont marqués par un faciès mixte de *Rhizophora* et *Avicennia*. Sur la rive gauche, de la pointe Denis à Kango, sont présents les sous bassins-versants de Mboma, de la Mbombé, de la Ntoulé, d'Obélo, de la Gongoué, de la Tsogué, de l'Igombiné, de l'Agoula, de la Remboué et, enfin, d'Awéné-Maga. Ces deux derniers sous bassins-versants sont dominés par un faciès de grand *Rhizophora racemosa*.

1.4 Estuaire (baie) de la Mondah

Le fleuve Mondah occupe un bassin-versant de 1200 km² avec un module brute de 74 m³/s (Saint-Vil, 1981; Lebigre, 1983). Le fleuve Mondah prend sa source dans les Grès de Ndombo et dans les reliefs environnants. Il constitue le plus petit bassin fluvial des trois estuaires (Komo, Mondah et Rio Mouni). Il représente 350 km² de mangrove.

Les mangroves de l'estuaire de la Mondah dépendent de 11 principaux sous bassins-versants. La rive droite collecte, de l'aval vers l'amont, les eaux des petits cours d'eau ou chenaux de marées que sont : Libi, Massotié, Ayong, Ngouanzé, Nzémé, et Ikoy-Mondah. Sur la rive gauche, de de l'aval vers l'amont, il y a des petits cours d'eau ou chenaux de marées que sont Ambouchou-Ntsini, Kam, Evangoué, Bombié et, enfin, Abondo (Carte 6, ci-après). Plusieurs cours d'eau ou chenaux de marée débouchent dans la Ntsini, notamment la Mamboumba et la Moka qui, outre les *Rhizophora*, ont la particularité d'abriter une forte colonie d'*Avicennia* et *Laguncularia*.

Carte 6 : Bassins versants de la Baie de la Mondah et affluents



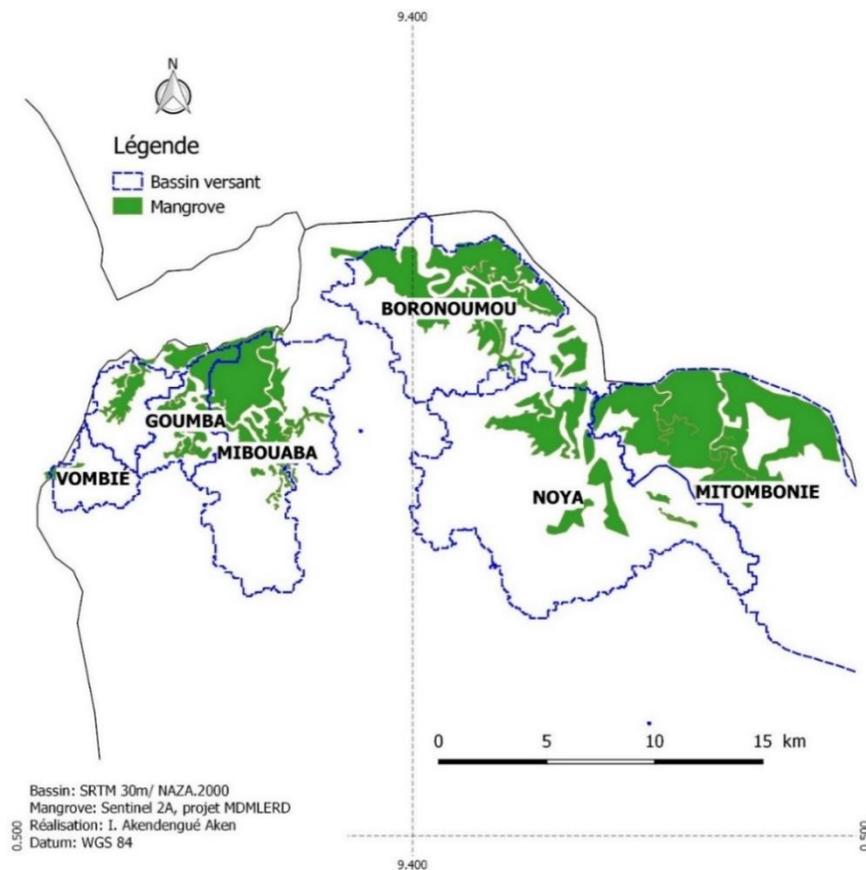
Par contre, Libi, Massotié et Ayong sont dominés par des faciès de grand *Rhizophora racemosa*. Les bassins de Ngouanzé, Nzémé et Ikoy-Mondah brillent par l'absence d'*Avicennia*.

Une forte colonie de *Rhizophora harrisonii* ou de *Rhizophora racemosa* de moins de 3 mètre de haut y est observée (Lebigre, 1990).

1.5 Estuaire Rio Mouni (fleuve Noya)

Le Rio Mouni est l'estuaire exutoire des fleuves Congue, Mifong et Mitemboni venant de la République de la Guinée Equatoriale, et du fleuve Noya venant du Gabon. Le fleuve Noya prend sa source dans les Monts de Cristal au Gabon (Carte 4). D'environ 100 km² de superficie (Carte 7, ci-après), les mangroves de l'estuaire du Rio-Mouni sont tributaires de 6 principaux bassins versants. En effet, il s'agit des principaux bassins-versants de la Noya et de la Mitemboni et des sous bassins-versants de la Vombié, de la Goumba, Mibouaba, Boronoumou (Carte 7, ci-après).

Carte 7 : Bassins versants de l'estuaire du Rio Mouni (Gabon)



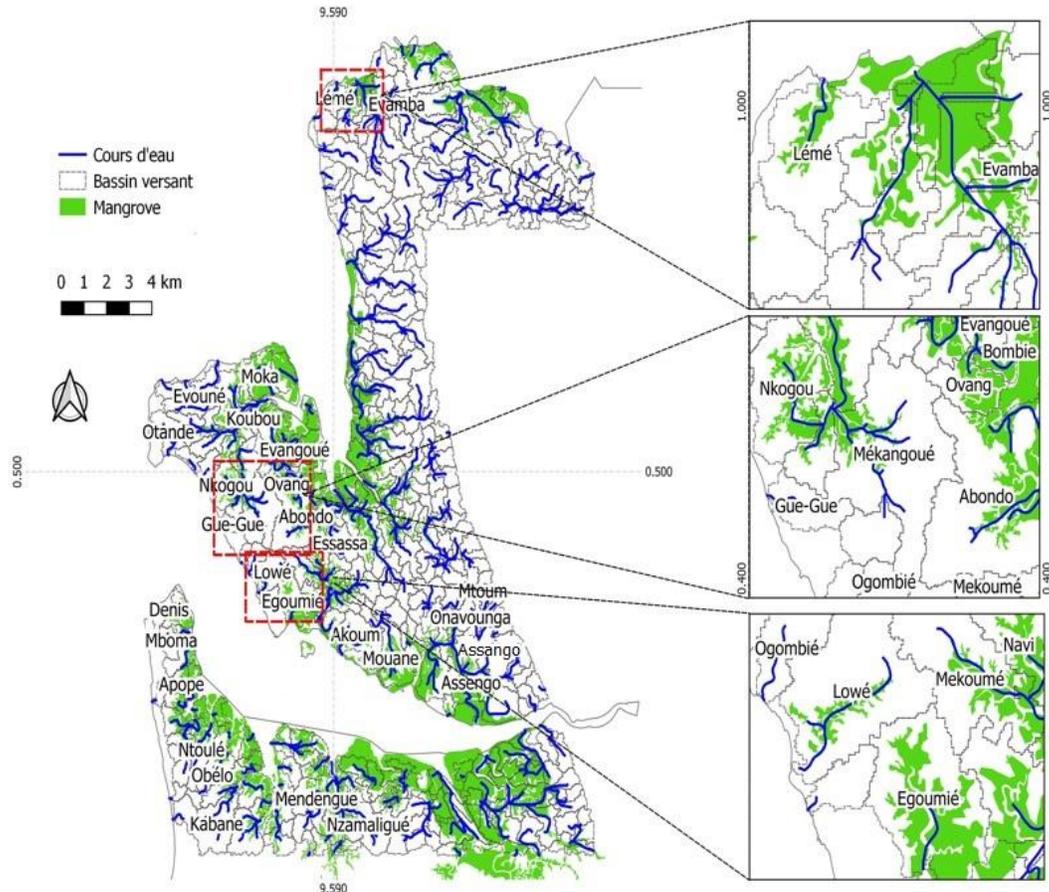
Les rives à mangroves de l'estuaire du Rio-Mouni sont peuplées essentiellement de *Rhizophora racemosa*, *Rhizophora harrisonii*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erectus*, *Phoenix reclinata* et *Acrostichum aureum*. Bien que peu étendues, ces mangroves ont la particularité d'abriter une grande et très diversifiée colonie d'espèces. Les raisons de cette particularité n'ont pas encore été élucidées.

Grosso modo, les mangroves de la province de l'Estuaire sont hébergées dans un complexe de quatre principaux bassins versants. En ordre de grandeur, il s'agit du bassin versant du fleuve Komo, suivit du bassin versant de la Mondah, du bassin versant du Rio Mouni et enfin, du bassin versant des petits cours côtiers.

L'ensemble de ce réseau hydrographique de drainage dendritique fait de la grande presque île de Libreville et de sa région une importante zone humide littorale. Dans ce contexte très aquatique, entre autres aspects, notons d'une part que les affluents de la rive droite du Komo et ceux de la rive gauche de la Mondah ont des têtes de sources très voisines, de part d'autre d'une ligne de crêtes qu'emprunte la Route Nationale 1. D'autre part, les affluents du Komo créent des isolats d'espèces de mangroves (Carte 8, ci-après).

Le premier isolat est celui de Libreville à partir des rivières Nkogou et Gué-Gué. Le deuxième est celui d'Owendo entre la Lowé et le Mékoumé. Ensuite, il y a un isolat moyen que constitue la presqu'île de Libreville à travers l'Ikoy-Komo et de l'Ikoy-Mondah. Enfin, le grand isolat formé de l'Nzemé dans la Mondah et l'Assango dans le Komo.

Carte 8 : Les bassins versants des cours d'eau des estuaires à mangroves



Réalisation : Akendengué Aken I., 2020 ; SRTM 30 m.

En résumé, les mangroves sont établies en zone de pente insignifiante comprise entre 1% et 2%. Le bassin-versant du fleuve Komo est constitué à 20% par la mangrove, 29% pour le bassin-versant de la Mondah et environ 15% dans le bassin-versant du Rio Mouni et de la Noya.

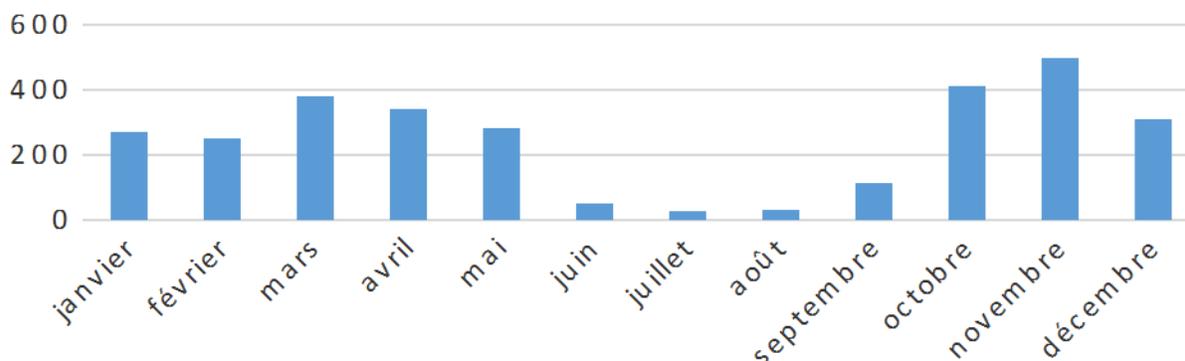
2. Conditions météo-marines Côtières

2.1 Climat

Le taux de précipitations moyennes annuelles dans l'ensemble du pays varie entre 1400 mm et 3400 mm, avec 2870 mm d'eau à Libreville (Maloba, 2011). Ces précipitations de région équatoriale sont très orageuses. Le nombre de jours de pluie atteint facilement 170 à 200 par an. Le climat de Libreville, comme celui de l'ensemble du Gabon, est marqué par quatre saisons : deux

saisons sèches et deux saisons de pluies. La durée de la saison sèche est courte juin à août (Histogramme 1, ci-après).

Histogramme 1 : Moyennes des précipitations annuelles à Libreville (1985-2015)



Source : Direction Générale de la Météorologie (2017).

Octobre et Novembre enregistrent les fortes valeurs d'eau tombée à Libreville, tandis que Juillet et Août sont marqués par des faibles quantités de chutes d'eau. Juillet est le mois le plus sec, tandis que mars, avril et novembre constituent les mois les plus arrosés, avec une chute d'eau de 313,5 mm en avril et 445,8 mm en novembre, de 1971 à 1990. La moyenne annuelle des températures minimales est de 23° C, contre 29° C pour les températures maximales, avec 27° C à Libreville (Maloba, 2004). Le taux d'humidité atmosphérique est toujours élevé, soit une moyenne annuelle de 87,7%. Le taux mensuel le plus bas a été observé en août (79,3%) et le plus fort en novembre (96%). Libreville a en moyenne 2 h 18 mn d'insolation par jour.

2.2 Houle

Bien que l'ensemble de côte Gabonaise soit sous l'influence de la grande houle allogène d'origine sud-ouest ou sud-Sud-ouest, les mangroves en sont épargnées (Mombo, 2017). En effet, les mangroves se développent en zone abritée. Elles ne sont touchées que par les houles résiduelles. Durant la saison sèche (juin à août), les vents ont une vitesse de 4 et 6 m/s en journée et 3 m/s la nuit. À cette période, les vents sont de secteur sud à sud-ouest. Par contre, en petite saison de pluie (février, mars et avril) les vents de tornade de secteur nord-est à sud-est prédominent avec une vitesse de 15 m/s et 20 m/s aux pointes sud-est (Bonfille, 1964 ; *in* Mombo, 2017).

2.3 Marées

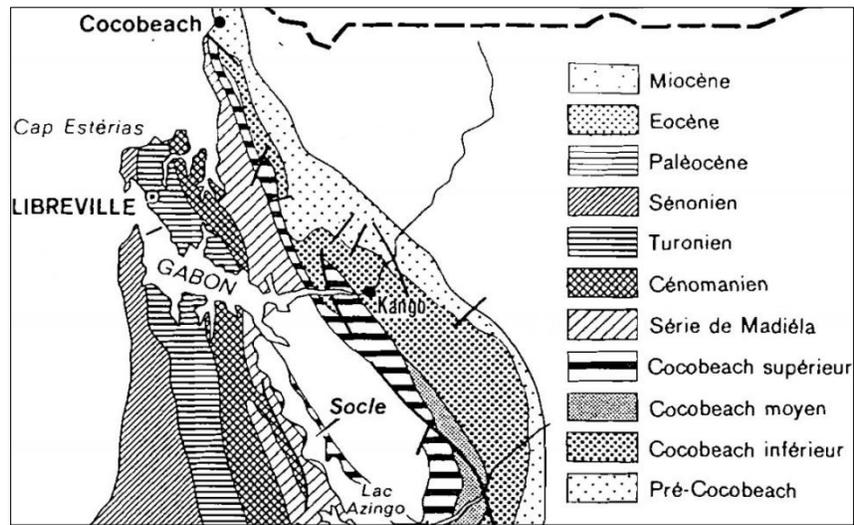
Au Gabon, pays de l'Est de l'Océan Atlantique, les marées sont de type semi-diurne. Elles se manifestent par des doubles pleines mers et des doubles basses mers. Selon Mombo (1991), la période moyenne d'alternance entre pleines mers et basses mers est de 12 h 20 mn ; le maximum étant de 14 h 08 mn et de 11 h 20 mn à 11 h 28 mn le minimum en marées exceptionnelles. La marée paraît à la fois comme un critère géomorphologique et écologique dans l'établissement des marais de mangroves (Lebigre, 1990). La zone de battement des marées, c'est-à-dire l'estran, et en arrière de celle-ci, sont le siège des marais maritimes à mangroves. Du point de vue écologique, la marée a un rôle déterminant dans le zonage floristique. En effet, les faciès floristiques sont repartis en fonction des étendues des marées. De plus, la marée joue également un grand rôle dans la dissémination des graines et plantules des palétuviers. En effet, que ce soit chez les palétuviers vivipares (*Rhizophora*), ou non vivipares (*Avicennia*), l'hydrochorie reste le mode de dissémination par excellence. Ainsi, la propagule du *Rhizophora* a une grande viabilité et résiste à la flottaison prolongée grâce à son noyau spongieux. Le fruit de l'*Avicennia* est cordiforme, légèrement comprimé, à style de calice persistant qui lui permet de flotter facilement sur l'eau (Andriamalala, 2007).

3. Cadre géologique et pédologique

3.1 Cadre géologique

Libreville et sa région sont une composante du grand ensemble sédimentaire côtier. Cette région monoclinale est constituée de deux grandes séries sédimentaires aux origines différentes: les séries anciennes et récentes (Plan minéral, 1971; Figure 1 et tableau 2, ci-après).

Figure 1 : Esquisse géologique du bassin sédimentaire côtier estuarien du Gabon



Source : Le Plan Minéral, 1971. NB : L'endroit, où est écrit le mot Socle laissé en blanc est une erreur. Cet emplacement est celui de la Série de Madiéla.

Tableau 2 : Echelle stratigraphique du bassin cotier gabonais

ERE	SYSTEMES	AGES*	ETAGES	SUBDIVISIONS LOCALES	
QUATER-NAIRE		2	HOLOCENE		AKOSSO
TERTIAIRE	NEOGENE	12	PLIOCENE	ALEWANA	N'TCHENGUE
			MIOCENE		M'BEGA
					MANDOROVE
	PALEOGENE	26	OLIGOCENE	MANDJI	N'GOLA
			EOCENE		ANIMBA
			PALEOCENE		OZOURI
		65			IKANDO
SECONDAIRE	CRETACE SUPERIEUR	115	MAESTRICHTIEN	ASSEWE	EWONGUE
			CAMPANIEN		POINTE CLAIRETTE
			SANTONIEN		ANGUILLE
			CONIACIEN		AZILE
			TURONIEN		CAP LOPEZ
	CRETACE INFERIEUR		CENOMANIEN	REMO N'KOMI	MADIÉLA
			ALBIEN	COCOBÉACH	EZANGA (SEL)
			APTIEN		N'ZEME ASSO
			NEOCOMIEN-BARREMIEN ("WEALDIEN")		N'TOUM
					REMOUE
		KANGO			
PRIMAIRE	PERMO-CARBONIFERE	136		KARROO KOUGOULEU	N'DOMBO
		180			M'YONE
		225	PERMIEN		AGOULA
		570			N'KHOM
PRECAM-BRIEN				NOYA	

* AGES EN MILLIONS D'ANNEES.

Source : Le Plan Minéral, 1971 ; échelle chronostratigraphique simplifiée.

En effet, les complexes Noya, Pré-Cocobeach et Cocobeach (inférieur, moyen et supérieur) datent du Précambrien à Aptien basal. Ces formations anté-salifères constituent des sédiments d'origines lacustres et continentales. Les quelques séries remarquables sont celles de Kango, Remboué et Ntoun, qui constituent des formations de marnes, et schistes bruns et noirs. L'ensemble constitue le sous-bassin sédimentaire côtier oriental, formant en partie la région des estuaires du Gabon à l'est du socle émergent du Horts de Lambaréné-Chinchoua jusqu'au Rio Mouni.

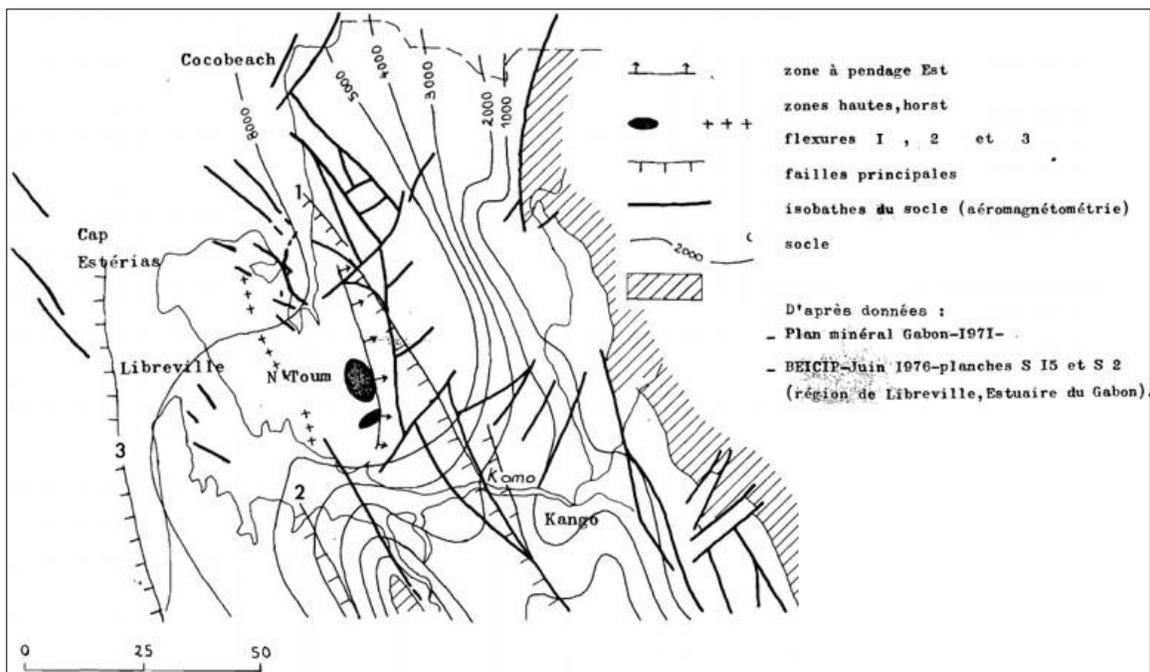
Ensuite, est intervenue la formation Ezanga (Aptien terminal), dite série Salifère, qui marque le début de la sédimentation d'origine marine formée par des dépôts carbonatés et argileux-sableux dont les principales séries sont : Madiéla (Albien), Cap Lopez (Cénomanién), Azilé (Turonien) et Anguille (Coniacien, ou Senonien inférieur). Les principaux faciès lithologiques sont les calcaires de Sibang, les grès, etc.

Regionalement, allant d'Est en Ouest ou des formations les plus anciennes vers les plus récentes, les mangroves du Rio Mouni sont établies sur les formations les plus anciennes de la Noya et du Cocobeach. Celles de Mondah sont sur les séries de l'Albien (Madiéla) coté Est et du Cénomanién coté Ouest. Les mangroves du Komo sont implantées sur les séries de l'Albien (Madiéla) et du Sénonien, ayant en commun pour les secteurs de la Remboué les séries de l'Albien et du Cénomanién avec celles de la Baie de la Mondah dans le même alignement côté oriental.

Mombo (1991) renseigne sur quelques faits géologiques ayant marqué la région des estuaires du Gabon. *Primo*, les trois estuaires, où sont établies les mangroves, sont des anciens fossés d'effondrement tectonique exploités en tant qu'anciennes vallées de la régression marine ogolienne (22 000 à 16 000 ans BP, niveau marin à +110 à -120 m par rapport au 0 actuel), puis par la dernière grande transgression marine dite holocène (8 000 à 5 000 ans BP, niveau marin à +0 à +1m par rapport au 0 actuel). *Secundo*, une partie des mangroves (Rio Mouni, Baie de la Mondah et la rive droite du Komo) est localisée dans le sous-bassin sédimentaire côtier oriental sur des séries plus anciennes allant du Précambrien au Crétacé inférieur. Tandis que les mangroves de la rive gauche du Komo sont en partie sur les formations géologiques du sous-bassin sédimentaire côtier occidental ou atlantique, à formations à majorité marine allant du Crétacé Supérieur à Quaternaire.

Tertio, la région littorale à estuaires est également le siège de phénomènes tectoniques que sont les failles et flexures (Plan minéral, 1971). En effet, les mouvements verticaux du socle vont marquer les série anté-salifères et les compartiments sédimentaires supérieurs. Ils se manifestent par des cassures et des flexures importantes dans le Crétacé et le Tertiaire. Ainsi, la structuration du bassin sédimentaire côtier Nord est caractérisée par des failles et flexures (Figure 2, ci-dessous). Le fait majeur de ses mouvements verticaux due à la tectonique de socle est l'apparition du horst de Lambaréné-Chinchoua à la fin du Barrémien (Plan minéral, 1971). Celui-ci marque une délimitation du bassin sédimentaire côtier gabonais en sous-bassin intérieur oriental et en sous-bassin atlantique occidental.

Figure 2 : Esquisse de la structuration du bassin sédimentaire côtier Nord



Source : Mombo J. B., 1991.

Le sous-bassin intérieur oriental est un synclinal faillé dont le flanc occidental à pendage Est est perceptible dans la région de Ntoum (Plan minéral, 1971 ; Thiéblemeont, 2009). Par contre, le sous-bassin atlantique occidental correspond à un vaste monoclinale orienté vers l'Ouest (Plan minéral, 1971).

3.2 Cadre pédologique

Les sols de la région sont de type ferrallitique ayant 60% des sables et 40% d'argiles (Mombo et Itongo, 2011). Mais, dans les mangroves, les argiles et argiles limoneuses sont les plus répandues à partir de 30 cm de profondeur (Delhumeau, 1969).

En région de mangrove, Delhumeau (1969) apporte les données suivantes :

- de 0 à 30 cm, un sol de couleur noire avec de petites taches de rouille aux limites floues, à la structure fondue avec une tendance polyédrique ; une porosité bonne, dans un ensemble compact, gorgé d'eau, marqué par une forte activité biologique (galerie de crabe) dans un chevelu dense de fines racines de palétuviers ;
- de 30 à 120 cm des argiles limoneuses noires sont observés dans un chevelu de racinaire très dense ; au-delà, de 120 cm, le carottier remonte vide, la vase étant maintenant trop liquide.

Toutefois, la dominance sableuse s'observe plus dans la Mondah et dans la partie aval du Komo. Dans la partie amont de la Remboué, il s'observe une dominance de sédiments riches en alluvions (Thiéblemont, 2009). De manière générale, les mangroves du Rio Mouni sont établies sur un sol sableux-argileux. Celles des estuaires du Komo et de la Mondah reposent sur un sol argileux et sableux.

3.3 Aux origines des estuaires et de la mangrove : entre Eres Tertiaire et Quaternaire

Deux conceptions se succèdent en ce qui concerne l'origine des mangroves en Afrique, d'après les palynologues et les géologues. Pour les premiers, les mangroves sont apparues en Afrique depuis l'Ere Tertiaire, se basant sur l'étude des pollens des espèces de mangrove de ces temps géologiques anciens. Par contre, pour les seconds, la mangrove est apparue au Quaternaire, précisément durant le Pléistocène, se référant aux mouvements eustatiques des ères géologiques couplés aux pollens.

3.4 Apparition des mangroves selon les palynologues

Selon un point de vu palynobotanique, l'origine des mangroves en Afrique remonte au Mio-cène durant le Cénozoïque (Maley, 1996). D'une manière générale, les premiers végétaux sont

apparues au Carbonifère à l'Ere Primaire. Les gymnospermes et les angiospermes sont apparues un peu plus tard au Crétacé. Toutefois, les études de pollens réalisées grâce aux prospections des compagnies pétrolières basées au Nigéria, au Cameroun, au Gabon et Congo révèlent que les angiospermes dans les régions précitées datent du Barrémien qui coïncide avec la série anté-salifère déposée à l'époque du Gondwana avant la séparation de l'Amérique du sud et l'Afrique (Maley, 1996).

Néanmoins, c'est beaucoup plus au Miocène qu'apparaîtront les angiospermes auxquels appartiennent les mangroves proches des formations actuelles. Le *Rhizophora* apparaît en Afrique pour la première fois au cours du Miocène, en même tant que les Bombacaceae avec *Rhodognaphalon brevicuspe*, les Sapotaceae avec *Mimusops*, les Myristicaceae avec *Pycnanthus angolensis* et les Rhizophoraceae avec *Rhizophora spp* (Maley, 1996). L'étude des pollens du Miocène traduit la période où le sous embranchement angiosperme s'est plus diversifié pour aboutir aux formes actuelles avec une diminution des gymnospermes (Maley, 1996).

3.5. Apparition des mangroves selon les géologues

Quatre périodes eustatiques successives retracent l'histoire de l'établissement côtière au Gabon : la transgression inchiennienne (40000-30000 BP), la régression ogolienne (22000-16000 BP), la transgression holocène (8000-5000 BP) et la légère régression taffolienne (3000 BP), selon Cornen et al. (1977).

D'abord, la phase de la transgression inchiennienne est marquée par un climat chaud et humide. Cela a favorisé l'établissement des mangroves avec niveau marin proche du zéro actuel. Cette situation a été mise en évidence au Congo Brazzaville par Giresse et al. (1980) et par Lebigre et al. (1990) au Gabon. En effet, le carottage d'une tourbe dans l'estuaire du Kouilou par Giresse et al. (1980) à -30 m du niveau actuel révélera l'existence d'une mangrove datant de 35000 BP. De même, Lebigre et al. (1990) découvriront une paléo-mangrove au niveau de la Sablière à Libreville datant de 34000 BP.

Ensuite, la phase de régression ogolienne est caractérisée par une savanisation avec un recul du couvert forestier. Elle marque une baisse du niveau marin à -120 m par rapport au zéro marin actuel. La période ogolienne correspond à l'établissement des estuaires et des cordons lagunaires, en passant le grand canyon sous-marin du Cap-Lopez (-150 m).

Aussi la phase de la transgression holocène traduit-elle l'enneigement des rias et leur remontée par une faune typiquement marine. Les *Madréporaires ahermatypiques* découverts à Owendo et datant de 6.400 BP en sont une illustration. Au cours de cette période, s'est fait le colmatage des rias par les sédiments marins sur lequel se sont développées les mangroves subactuelles et actuelles.

Enfin, une légère régression dite taffolienne s'est observée autour de 3000 BP. Au cours de cette période c'est mise en place la couverture éolienne des cordons littoraux. Le niveau marin étaient compris entre -10 et -20 mètres. Elle marque la formation de la vase et des conditions climatiques actuels.

Ces deux avis complémentaires admettent toutes que la mise en place des mangroves est antérieure à la mise en place des estuaires. En effet, les estuaires se sont établis pendant la période pré-holocène de l'Ogolien (25000-22000 à 18000 - 16000 BP). Au cours de cette période les fleuves côtiers ont élaborés des profondes vallées incisées (Giresse, 1969 ; Giresse et *al.*, 1990 ; Peyrot, Clist et Oslisly 1990 ; Mombo, 1991, Clist, 1995).

4. Végétation et activité humaine : quelle relation ?

4.1. La végétation littorale

«On trouve dans ces vastes régions littorales gabonaises différents milieux physiques qui constituent aussi des milieux de vie pour nombre d'espèces végétales et animales. Il s'agit du littoral septentrional à rias, du littoral central à delta de l'Ogooué et enfin du littoral méridional à lagunes. Les milieux de vie sont essentiellement composés de formations végétales» (Ondo Assoumou, 2017).

La région est dominée par une forêt secondaire due à l'activité forestière. Les espèces végétales les plus représentatives sont : *Musanga cecriopioïdes* (Parassolier), *Aucoumea klaineana* (Okoumé), *Pycnanthus angolensis* (Ilomba), *Ceiba pentandra* (fromager), *Xylopi aethiopica* (Okala), *Anthocleista vogelii*, *Pentaclethra macrophylla* (Mubala), *Mitragyna ciliata* (Bahia), *Lophira alata* (Azobé ou bois de fer), *Musanga cecriopioïdes* (Parassolier), etc . On y trouve également des arbres fruitiers : *Terminalia catappa* (badamier), *Mangifera indica* (manguier), *Elaeis guineensis* (palmier), *Cocos nucifera* (cocotier), *Musa acuminata* (bananier), etc. Les grandes plantes herbacées représentées sont les Zingibéracées (*Aframomum giganteum*, *Megaphrynium macrostachyum* et *Thaumatococcus danielli*) et les Maranthacées (*Gleichenia linearis* (Polypodiaceae)). Le long des berges en remontant la Remboué, la Nzémé et le Komo après Kango, les colonies de mangrove font place à des colonies de palmier raphia et de *Pandanus candelbrum*.

4.2. Activités liées aux mangroves

La principale activité liée aux mangroves est la pêche (Figure 3, ci-dessous). En effet, les mangroves dans les estuaires du Rio Mouni, de la Mondah et du Komo ont la particularité d'abriter les communautés de pêche. En effet le Rio Mouni abrite deux communautés de pêcheurs : la Nigériane et la Béninoise.

Figure 3 : Aperçu des prises de l'activité halieutique aux abords des mangroves à Cocobeach et à Owendo



Clichés : Projet MDMLERD, 2017.

Dans la Mondah, notamment sur les rives de la Tsini, il existe également deux communautés de pêcheurs ; une spécialisée dans la pêche de mullet (*Mugil cephalus*), et l'autre dans la pêche de sardine (*Sardina pilchardus*).

Un peu plus loin à Bambouchine une forte communauté de pêcheurs locaux Fang et Sékiani exerce ses activités de pêche dans les mangroves et hors de celles-ci. Dans l'estuaire du Komo des communautés de pêcheurs Nigériens et Béninois habitent aux abords des mangroves singulièrement sur la rive gauche de la Lowé. Toutefois, ces communautés exercent leurs activités hors des mangroves. Les communautés locales Fang et Mpongwé qui résident aux abords des mangroves notamment Donguila, Chinchoua, Makok et Kango, ont des activités de subsistance liée aux mangroves.

Il ressort que la mangrove fait l'objet de deux types d'usagers : celui qui vit au sein des mangroves et exerce une activité liée à ce milieu, et celui vivant hors des mangroves et qui exerce une activité quelconque dans les mangroves (Ondo Assoumou, 2017). A côté de ces communautés existe d'autres catégories de personnes. Donc, la mangrove fait également l'objet de deux catégories d'occupants : celui exerçant dans la mangrove et celui non exerçant dans la mangrove. La première catégorie est généralement constituée des pêcheurs. La deuxième catégorie est constituée des personnes qui, en quête de terrain, ont occupé les mangroves. Qu'il s'agisse de l'une ou l'autre catégorie, deux aspects se dégagent : la prédation et la cohabitation.

D'une part, les mangroves en zone périurbaine ou urbaine font l'objet de prédation. En effet, « *les populations vivant autour ou à proximité des mangroves détruisent également ces écosystèmes pour construire des latrines, douches, lavabos artisanaux en plein air et puits* » (Ondo Assoumou, 2017). Ce comportement, qualifié de « *mangrovicide* » par Ondo Assoumou (2017), marque de manière générale l'action néfaste d'une catégorie de personnes sur la mangrove.

D'autre part, certains usagers des mangroves manifestent un sentiment de cohabitation pacifique avec la mangrove que nous qualifions de « *mangropathie* ». En effet, à Ondogo et à Egoumé, certaines personnes vivent en harmonie avec la mangrove. Tandis qu'Alénakiri, Akanda

et Alibandeng, les populations, nouvellement occupant ou non, exercent une pression sur la mangrove en la défrichant. Avec le temps, lorsque ces populations subissent les effets corollaires à leurs actes, certaines d'entre-elles manifestent une *mangrovicidité* atténuée que nous appelons *amangropathie*. Ils cohabitent désormais pacifiquement avec la mangrove, mais juste par crainte des conséquences. Toutefois, *amangropathiste* ou *mangropathiste*, l'un ou l'autre conduit vers la conservation des mangroves. Certains occupants des mangroves initient des opérations privées de reboisement de celles-ci autour de leur concession, pour essayer de rétablir l'équilibre. En effet, à Ondogo un riverain a replanté la mangrove autour de sa concession. De même du côté d'Akanda, les dignitaires du village Mamboumba ont entrepris des démarches pour la réhabilitation d'une ancienne mangrove qu'ils avaient détruite il y a une trentaine d'année. En fait, pour avoir une vue sur la mer, une personnalité du village avait coupée toute la mangrove qui faisaient obstruction à la vue. Depuis un peu plus de 5 ans, les populations ont constaté que les vagues arrivent désormais jusque dans certaines concessions. Ainsi, elles ont constaté que les mangroves, rasées il y a 30 ans, protégeaient le village des vagues, d'où leur initiative salutaire commune de réconciliation avec la nature.

Les opérateurs économiques ne sont plus en marge dans ce processus de restauration du milieu des mangroves. En effet, en l'espace de 8 mois, trois opérateurs privés ont entrepris des démarches liées à un reboisement (*replanting*) des mangroves environnantes du port d'Owendo. Aussi, déjà en 2011, la société SOGEA avait fait reboiser une mangrove à Okala dans la commune d'Akanda.

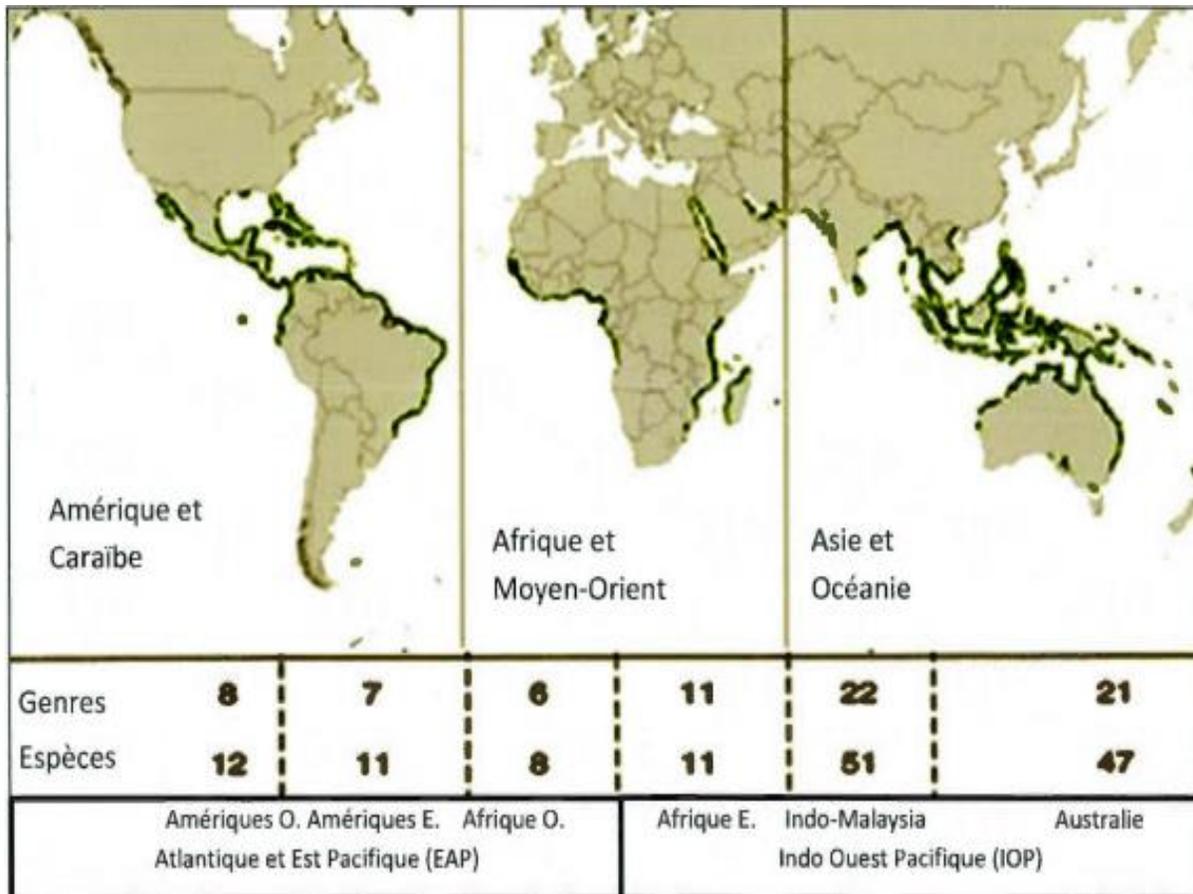
Ce constat de changement de perception envers la mangrove n'est pas un fait isolé au Gabon. Il est également observable au Sénégal, en Guinée Conakry et en Malaisie où des communautés villageoises de pêcheurs ont décidé de replanter les mangroves après avoir remarqué que les captures halieutiques diminuaient avec le recul de ces forêts qu'ils avaient perpétré pour des raisons de culture de riz ou d'élevage de crevette (Rue, 1998).

5. Généralités: mangrove, biomasse et carbone

5.1. La mangrove : une forêt particulière

La mangrove est une singularité des littoraux tropicaux. Elle a la particularité d'être l'interface entre la terre et la mer. Cette situation lui confère le privilège d'être convoitée à la fois par les êtres aquatiques, non aquatiques et aviaires. Bien que n'ayant qu'une soixantaine d'espèces dans le monde, dont une cinquantaine en Asie, dans bien des cas les mangroves sont au centre du cycle biogéochimique du globe terrestre (Figure 4, ci-après).

Figure 4: Distribution mondiale des mangroves et potentiel taxonomique



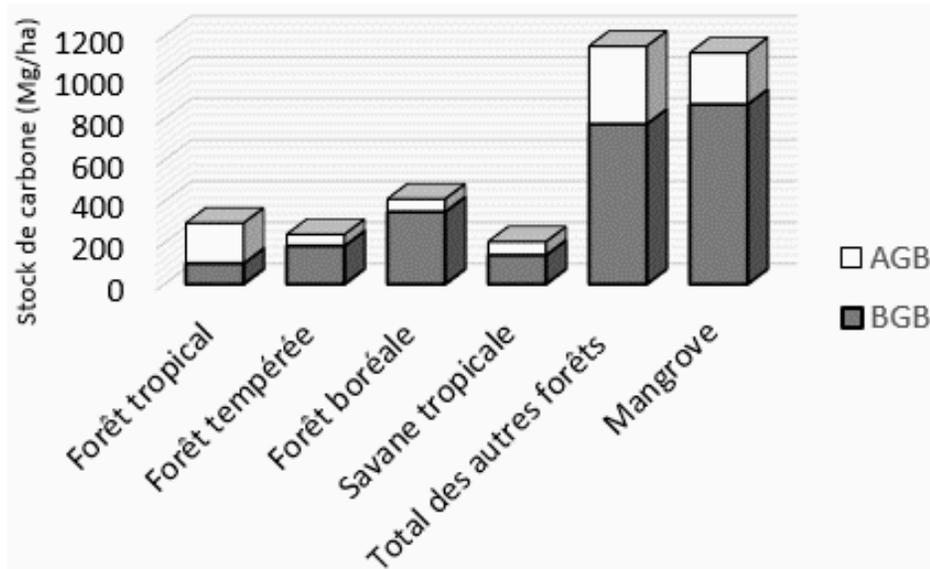
Source: Alongi (2002).

L'Afrique occidentale a 6 genres et 8 espèces ; par contre, l'Afrique orientale en compte 11 genres et 11 espèces. L'Afrique orientale a 1 genre et 3 espèces de moins que les autres pays de la côte atlantique.

En effet, de tous les écosystèmes forestiers, aucun n'a un taux de séquestration supérieur à celui des mangroves. En culminant les stocks de tous les autres écosystèmes forestiers *lato sensu*

(forêt tropicale, forêt tempérée, forêt boréale et savane tropicale), seule la biomasse aérienne dépasse celle des mangroves (Histogramme 2, ci-après). La biomasse souterraine des mangroves reste au-dessus de tous les autres écosystèmes forestiers, malgré le cumul de stock (Donato et *al.*, 2011; Kauffman et *al.*, 2011).

Histogramme 2 : Capacité de stockage des grands écosystèmes forestiers du monde



Source : Les données de carbone dans les forêts ordinaires proviennent de l'IPCC (2001) et Laffoley et Grimsditch (2009). Celles des mangroves sont issues de Donato et *al.* (2011) et Kauffman et *al.* (2011). Bien que cumulés, les stocks de carbone des autres écosystèmes forestiers peinent à dépasser le stock de carbone des mangroves.

L'Asie et l'Océanie ont le plus grand nombre d'espèces et de genres de mangroves. De façon globale, les mangroves de l'Océan Atlantique sont les plus pauvres en espèces et en genres (Alongi, 2002 ; Giri et *al.*, 2011).

Cette primauté du carbone souterrain des mangroves par rapport aux autres types de forêt est liée à la salinité et au manque d'oxygène (O₂), qui réduit l'action des micro-organismes donc la décomposition de la matière organique.

Trois familles de mangroves pures sont rencontrées au Gabon (Rhizophoraceae, Verbenaceae et Combretaceae) et deux familles associées (Arecaceae et Pteridaceae). Les six genres dénombrés sont : *Rhizophora*, *Avicennia*, *Laguncularia*, *Conocarpus*, *Phoenix* et *Acrostichum*. Le

genre *Rhizophora* compte trois espèces : *Rhizophora racemosa*, *Rhizophora harrisonii* et *Rhizophora mangle* (Figure 5, ci-après).

Figure 5: Variété des mangroves rencontrées dans les estuaires au Gabon

Photo 1: Feuille de *Rhizophora Racemosa* à Alibandeng



Photo 2: *Laguncularia racemosa* à Cocobeach



Photo 3: Feuille *Conocarpus erectus* adulte à Essassa



Photo 4: Fruit de *Rhizophora Racemosa* à Alénakiri



Photo 5: Fruit à *Laguncularia racemosa* à Oveng



Photo 6: Fruit *Conocarpus erectus* à Oveng



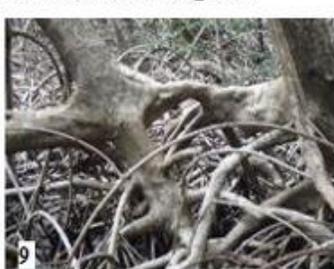
Photo 7: *Acrostichum aureum* à Cocobeach



Photo 8: Sous-bois d'*Avicennia germinans* à Donguila



Photo 9: Sous-bois de *Rhizophora racemosa* à Donguila



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Clichés : projet MDMLERD, 2017.

Le genre *Rhizophora* demeure le plus répandu suivi du genre *Avicennia* (Lebigre, 1990; Ondo Assoumou, 2006). *Rhizophora* se rencontre en front de mer, tandis qu'*Avicennia* est en zone abritée. La famille de Combretaceae se rencontre généralement en zone de contact mangrove forêt de

terre ferme. *Acrostichum aureum* est présent en zone de faible salinité, tandis que *Phoenix reclinata* est localisé en zone surélevée par rapport aux mangroves. Toutefois, ces deux dernières espèces traduisent une désalinisation progressive du milieu.

5.2. La biomasse

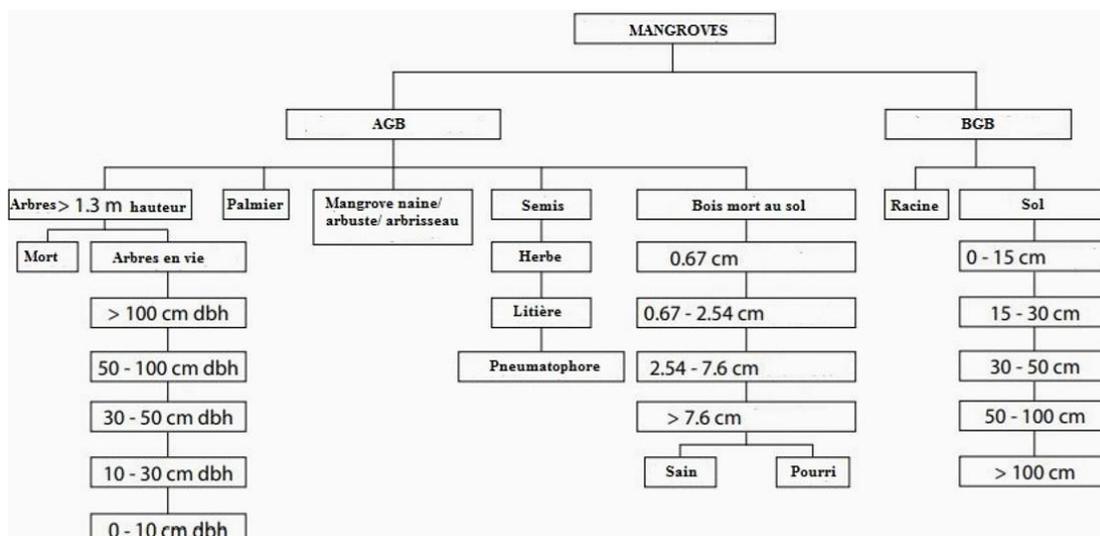
La biomasse renvoie à une fraction de masse vivante d'un organisme, ou de tout un écosystème, rapportée en unité de surface. Tout être vivant dispose alors d'une biomasse. Vu dans ce sens, cela prête à confusion étant donné que les animaux font également partie de la biomasse. En cela, dans sa théorie du géosystème, Sochava (1960) éclate la biomasse en phytomasse, zoolomasse, nécromasse, aéromasse, géomasse, hydromasse et lithomasse (Beroutchachvili et Bertrand, 1978; Beroutchachvili et Radvanyi, 1978).

La biomasse est généralement perçue comme la masse de matière vivante des arbres des mangroves rapportée en unité de surface, soit Kg ha^{-1} ou t ha^{-1} ($\text{t ha}^{-1} = \text{Mg ha}^{-1}$) [Brown, 1997 ; Kauffman et al., 2011; Amat et al., 2015]. Elle se décompose en biomasse épigée ou aéromasse, et en biomasse hypogée ou endomasse.

La biomasse épigée (AGB) se subdivise en 5 sous-compartiments : les arbres debout constitués des arbres en vie et morts ; les palmiers et les mangroves arbustives ; les semis composés d'herbiers, de litière et pneumatophores (Kauffman et al., 2011). Enfin, il y a les bois morts au sol, dans lequel on retrouve le sous-compartiment bois morts non pourris et le sous-compartiment bois morts pourris.

La biomasse hypogée (BGB) a, d'une part, le sous-compartiment racinaire et, d'autre part, le sous-compartiment sol. Chaque compartiment et même sous-compartiment ici présents obéissent à une méthode particulière de mesure, ou de prélèvement d'échantillon (Kauffman et al., 2011). Malgré les différences dans le protocole de prélèvement d'échantillon, toutes ces mesures se font dans les mêmes placettes et au même moment (Figure 6, ci-après). Autant il y a des sous-compartiments, autant il y a d'équipe de travail de terrain.

Figure 6 : Bassin de biomasse dans les mangroves



Source : Kauffman et *al.* (2011), d’après le protocole de mesure de carbone en zone de mangroves. L’AGB est composé de 5 sous-compartiments, tandis que la BGB dispose de deux sous-compartiments.

5.3. Le carbone (C)

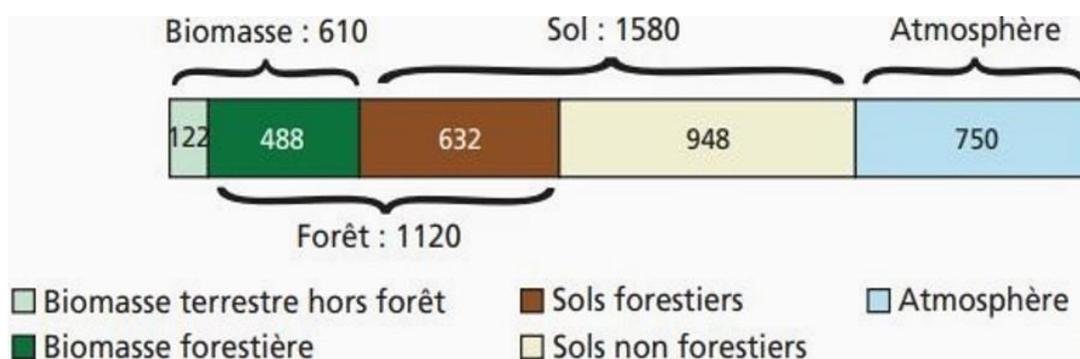
Le carbone est un élément chimique simple et le plus abondant de la terre, que l’on retrouve dans tous les êtres vivants et matériaux inertes. Aussi, est-il primordial à toute forme de vie. Le suivi de la concentration du carbone dans l’atmosphère permet de contrôler l’effet de serre (Pachauri et *al.*, 2008). Dans la nature, le carbone se trouve sous deux principales formes : organique (CO) et inorganique (CI). Le carbone organique est produit par les êtres vivants. Tandis que le carbone inorganique est celui qui est enfoui dans le manteau terrestre, constituant de nombreuses roches parmi lesquelles les roches carbonatées telles que les calcaires. Le carbone inorganique est également dans l’atmosphère et dans l’eau, en forme dissoute (Nkoue, 2008).

- Carbone organique (CO)

Le carbone organique constitue environ 50% de la masse vivante d’un organisme, donc de la matière organique (biomasse). Ils sont tous deux liés dans leur évolution respective. La matière organique est la résultante de la putréfaction végétale, animale et micro-organique (Schlesinger et

Melack, 1981). A l'état naturel, le carbone organique subit un métabolisme sous l'action de la minéralisation, ou de l'enfouissement, qui la conduit en tourbe, lignite, charbon, hydrocarbure liquide ou gaz naturel si le cycle n'est pas interrompu. A court terme géologique, la biomasse stocke le carbone organique. La photosynthèse transforme le carbone inorganique (CI), du dioxyde de carbone (CO₂) contenu dans l'atmosphère, en carbone organique (CO). Tandis que la respiration transforme le carbone organique (CO) en carbone inorganique (CI), indirectement en dioxyde de carbone (CO₂) principal gaz à effet de serre (GES); Nkoue (2008). La respiration et la photosynthèse sont deux phénomènes dépendants l'un et l'autre pour les végétaux, car leur vie en dépend. Cela rend leur flux plus rapide et important, en termes d'échange, mais pas en termes de stock, d'autant plus que le carbone stocké en journée est rejeté dans la nuit. C'est donc le bilan du carbone stocké et du carbone rejeté qui est emmagasiné par la plante. Par contre, les processus de minéralisation et d'enfouissement sont plus lents avec peu des échanges ce qui rend le processus plus long, d'où les quantités importantes de leur stock. En effet, le carbone au sol en général est estimé à 1580 Gt C à l'échelle mondiale, dont 26% de stock dans les premiers mètres en milieu tropical. Le sol regorge environ trois fois plus de carbone que les végétaux (≈610 Gt C), dont 40% sont en milieu tropical, et deux fois plus que l'atmosphère (≈740 Gt C) [Batjes et al., 1997 ; Feller et al., 2008; Mitra et al., 2014] ; Figure 7, ci-après.

Figure 7 : Comparaison de capacité de stockage de biomasse



Source : d'après l'IF (n° 7, mars 2005) et les données du GIEC (2001). La contribution du carbone souterrain est de loin la plus importante.

Donc la mangrove, comme tous les végétaux, piège le dioxyde de carbone par la photosynthèse qui est une qualité propre à tous les végétaux chlorophylliens. La particularité de la mangrove réside dans sa production de litière, et son milieu restrictif à la vie des micro-organismes nécessaires à la dégradation et à la transformation rapide de la matière organique. Ainsi, le carbone

contenu dans les débris et feuilles des végétaux reste enfoui dans le sol ; ce qui, au fil des temps géologiques, devient un stock important. Un m³ de mangrove contient au sol 1023 t ha⁻¹ de carbone, entre 0,5 et 3 m de profondeur (Donato et *al.*, 2011). Donc, un défrichement de mangrove entraîne une érosion du carbone organique, qui se transforme en dioxyde de carbone ; vu que le carbone est un élément thermolabile⁴. La simple exposition des terres autrement occupées par les mangroves suffira pour transformer le carbone organique en carbone inorganique.

- Carbone inorganique (CI)

Le carbone inorganique, aussi appelé carbone minéral, est contenu dans trois réservoirs : atmosphérique, océanique et lithologique. Dans le réservoir atmosphérique, le carbone est à l'état gazeux (CO₂), dont la principale source naturelle est le volcanisme. En effet, l'activité volcanique, de part et d'autre dans le monde, rejette dans l'atmosphère le dioxyde de carbone sous forme de vapeur.

Le carbone inorganique est également contenu dans les eaux continentales, transporté dans les océans sous forme dissous. Ce carbone continental est essentiellement issu de la désagrégation mécanique des roches carbonatées (calcaires). Effet, 2/3 du carbone inorganique dissous (CID) atmosphérique proviennent de la désagrégation mécanique des roches; et 1/3 provient de l'altération chimique des roches carbonatées et des sols. Par contre, dans les eaux continentales, le CID provient d'une part de l'atmosphère sous forme de précipitation, de l'oxydation de la matière organique des sols et rivières et, d'autre part, de l'altération chimique de la roche silicatée (Dandurand et *al.*, 1982; Nkoue, 2008). Donc la mangrove, en sa qualité d'interface entre sol et mer, piège le carbone à la fois dans les sédiments qui proviennent de l'océan, et les sédiments qui viennent du continent. En effet, le mouvement des vagues entraîne des matériaux, qui viennent se déposer dans les racines des mangroves. Lesquels matériaux sont issus de l'intérieur du continent, à travers des rivières et fleuves. Mais, il vient également du fond des baies, estuaires et océans, à travers les courants marins et les vagues. Il y'a aussi une autre source non négligeable constituée des apports

⁴ Qui a la capacité de s'évaporer en présence de la chaleur, à partir d'un certain seuil.

de ruissellement qui viennent se déposer en arrière-mangrove et tapissent les racines des mangroves. Toutes ces particularités confèrent à la mangrove une place de choix dans le contrôle des gaz à effet de serre et dans le cycle biogéochimique. En gros, quel que soit le réservoir, il y'a deux sources de carbone : la biomasse pour le carbone organique, et le dioxyde de carbone pour le carbone minéral. En d'autres termes, la biosphère est le centre du carbone organique, l'atmosphère et l'hydrosphère sont le centre du carbone minéral, et la lithosphère est le centre de l'immobilisation du carbone organique et du carbone minéral.

5.4. Géosystème

Le géosystème est perçu comme un volume, qui se traduit en trois dimensions spatiales. La première dimension est abiotique (lithomasse, aéromasse et hydromasse). La deuxième dimension est biotique, la phytomasse et la zoomasse qui forment le biome. Enfin, il y a la dimension anthropique (Beroutchachvili et Bertrand, 1978). Aussi, le géosystème est-il régi par plusieurs transformations, qui régulent le mode de fonctionnement de la biosphère. Ainsi, il y a la transformation de l'énergie solaire, dont une partie contribue à la photosynthèse des végétaux qui en utilisent pour transformer le carbone minéral en carbone organique. Et, il y a la transformation liée au cycle de l'eau, à l'intérieur du géosystème (évaporation, évapotranspiration, condensation et précipitation). Aussi, distingue-t-on la transformation biogéodynamique qui régule les échanges quantitatifs et qualitatifs de la matière : la transformation de la matière organique en humus ou la minéralisation. A cela s'ajoutent les transformations géomorphogéniques, qui régissent les modelés et les volumes rocheux. Et, enfin, les mouvements de masse aérienne qui régulent les couches gazeuses de l'atmosphère (Beroutchachvili et Radvanyi, 1978). Il ressort que, outre la variation spatiale verticale (géohorizon) et la variation spatiale horizontale (géofaciès), qui sont pris en compte non seulement dans la structure verticale et horizontale de la mangrove, il y a aussi le mode de la fonction que joue chaque structure sur la dimension anthropique du géosystème qui est intégrée. Avec cela, il ne faut pas oublier les interactions entre les dimensions et les structures spatiales horizontale ou verticale imposées par les paramètres physico-chimiques. Vue dans cette approche, la notion de géosystème, qui intègre tous les réservoirs de carbone à travers un champ spatial, place la répartition et les quantifications du carbone dans les arcanes du biogéographe. Surtout que tout se joue sur une portion de territoire homogène vue en trois dimensions, dont les deux dimensions spatiales (géohorizon et géofaciès).

- Géohorizon

Le géohorizon est la structure verticale interne d'un géosystème. Il est constitué en strates superposées les unes sur les autres. La strate de dessus est différente de la strate de dessous. Ces strates peuvent revêtir, une forme, un volume, une structure, une texture ou une couleur. Elles peuvent donc être abiotiques ou biotiques.

- Géofaciès

Le géofaciès représente la structure horizontale interne d'un géosystème. Ici, le géosystème est perçu maintenant dans une dimension horizontale. Chaque unité horizontale constitue une mosaïque, où chaque pavé est différent de celui qui lui est proche spatialement. Contrairement à l'écosystème, qui se limite à un fonctionnement biologique et métabolique où le non vivant est subordonné au vivant, le géosystème a un fonctionnement biotique et abiotique basé sur la notion de territoire et d'espace. Le géosystème englobe alors celle d'écosystème basée sur la relation entre les individus dans un milieu et avec leur milieu.

Enfin, la mangrove a une particularité de stockage de carbone supérieure à celle des autres formations forestières. Toutefois, sa haute capacité stockage est plus élevée dans le sol. Ainsi, le carbone, élément constitutif de toute matière vivante et inerte, est sous trois formes dans la nature : inorganique, organique et gazeuse. Aussi, le pont convertisseur entre ces trois formes est la photosynthèse des plantes. Les géographes, sous l'impulsion de l'école Russe, conçoivent les études de biomasse et de carbone en trois dimensions : la dimension abiotique, la dimension biotique et la dimension fonctionnelle. Le tout est mis en exergue sur un plan vertical (géohorizon) et un horizontal (géofaciès). Ceci débouche alors sur les méthodes de la recherche menée.

CHAPITRE II: Méthodes de l'étude

La collecte de données dendrométriques et environnementales est une tâche indispensable et ardue, dans un paysage où la circulation n'est pas aisée. La collecte obéit à un protocole particulier, depuis l'acquisition de l'information jusqu'à son traitement. Ceci d'autant plus que de cette donnée primaire découlera une donnée dite secondaire obtenue en laboratoire, notamment les infradensités. L'analyse des données, les méthodes d'estimation des équations allométriques aussi bien au sol que par télédétection, ainsi que les techniques de mise en place de modèles de distribution, ont été mises à contribution.

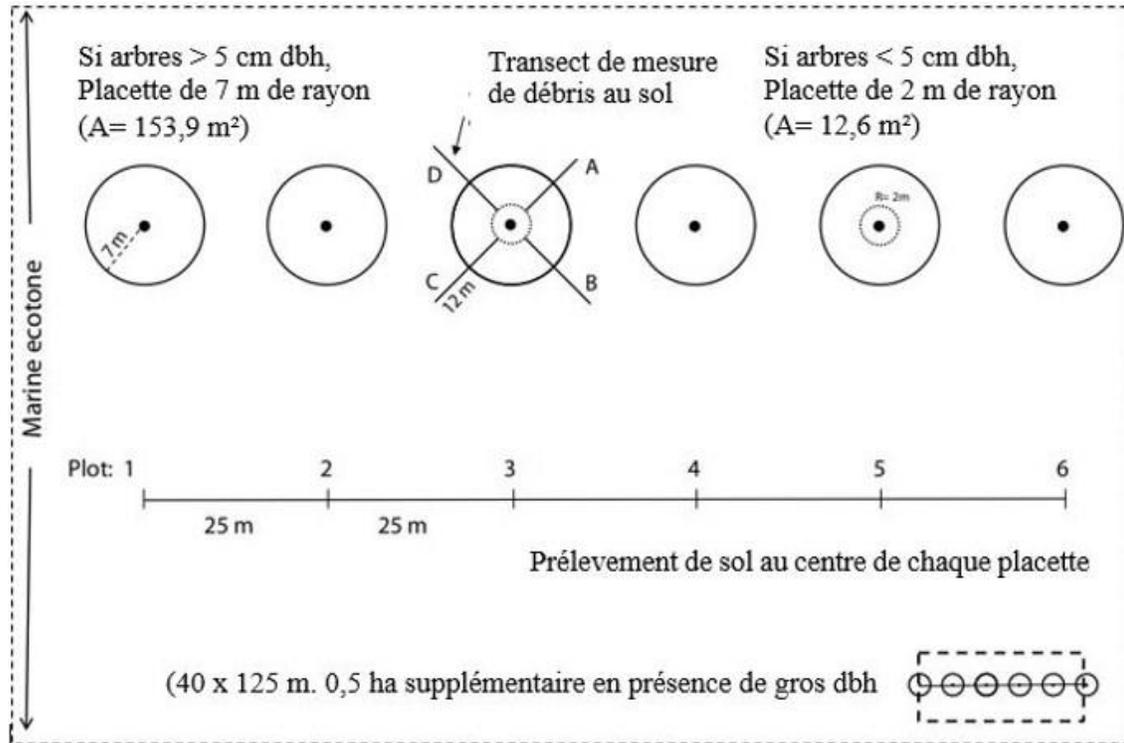
1. Collecte des données

1.1. Nature des données collectées

La collecte de données s'est faite en deux campagnes de plusieurs missions dans les estuaires du Komo, de la baie de la Mondah et du Rio Mouni. La première campagne a consisté à collecter quatre types de données : les paramètres physico-chimiques du milieu, les paramètres structuraux et les paramètres géographiques de chaque arbre. La deuxième campagne était axé sur la collecte des aliquotes des espèces, afin de déterminer l'infradensité du bois des dites espèces.

Le protocole a consisté à matérialiser des transects aléatoires de 100 m de long perpendiculaires à la crique, sur des sites choisis aléatoirement. A chaque 20 m du transect, se trouvait une placette circulaire de 7 m de rayon, soit 154 m², lorsque les arbres avait un DBH > 5 cm. Dans le cas où le DBH était < 5 cm, nous réalisions plutôt des placettes de 2 m, soit 12,6 m² (Kauffman et *al.*, 2011). Ainsi, nous avons obtenu 16 transects, soit 95 placettes pour 14630 m² (Figure 8, ci-après).

Figure 8 : Dispositif de transect et placette selon le protocole de Kauffman et al. (2011)

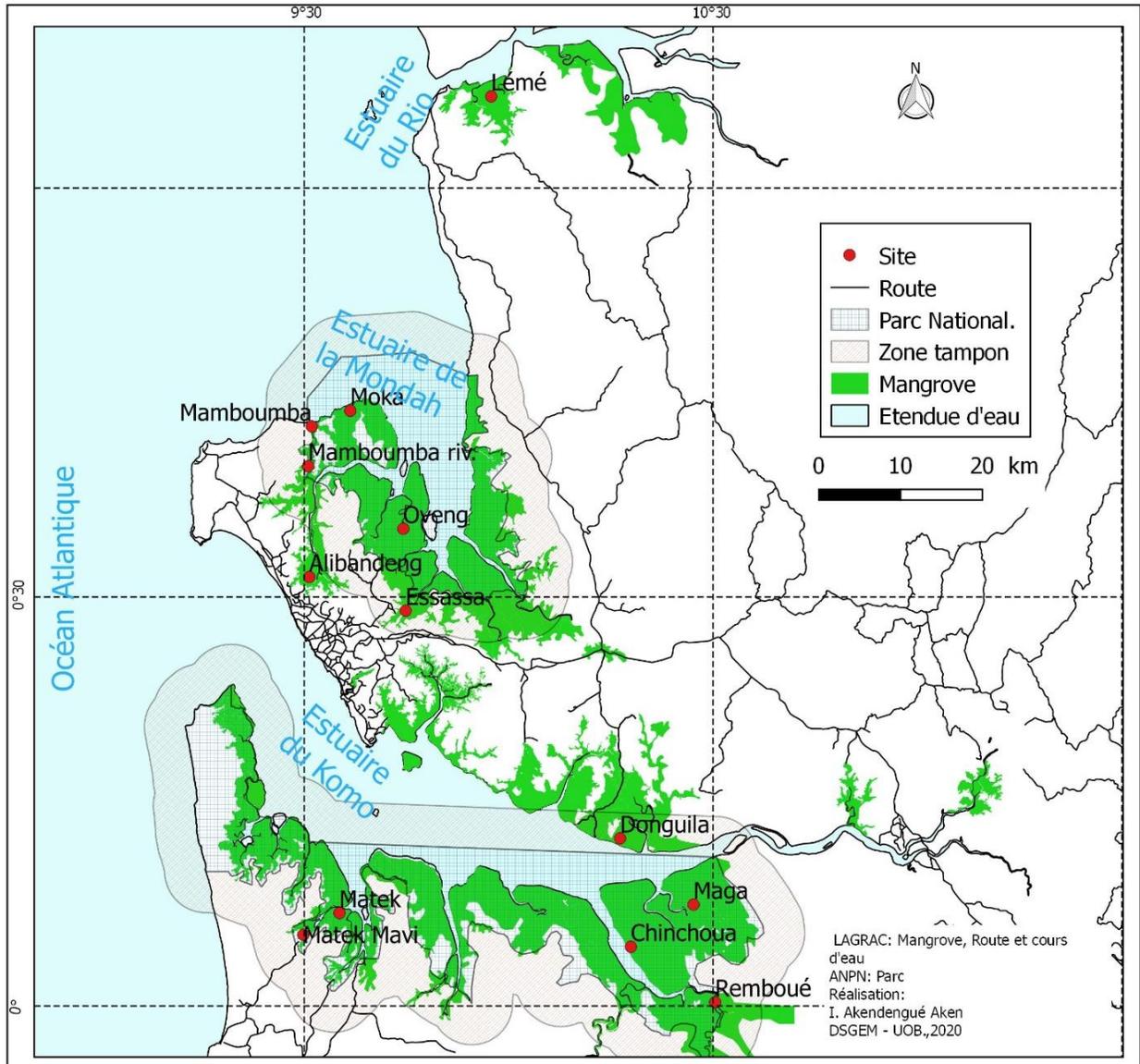


Source : Kauffman et al. (2011).

Lorsque des individus de gros diamètres (DBH > 50 cm) étaient observés, systématiquement la placette était réaménagée à 0,5 ha, soit 40 m x 125 m. Ceci, de manière à ce que la placette couvre le transect de 100 m de long et 40 m de large. Pour l'ensemble de la placette, chaque arbre a été géoréférencé. L'altitude de chaque placette a été relevée. Au total, il y a eu 5 transects dans l'estuaire du Komo, 8 transects dans l'estuaire de la Mondah et 2 transects dans l'estuaire du Rio Mouni (Carte 9, ci-après).

Le transect compte 6 placettes de 7 m de rayon, soit 153,9 m². Le rayon peut être ramené à 2 m, lorsqu'il y a beaucoup de petits individus < 5 cm de DBH. Les placettes sont à 20 m de distance, les unes des autres. En cas de forte densité des gros individus, une méga-placette de 40 x 125 m, soit 0,5 ha, est établie ; le cas à Mamboumba et à la Remboué.

Carte 9 : Sites d'échantillonnage



L'estuaire du Rio Mouni compte 1 site, l'estuaire de la Mondah en a 6 et l'estuaire du Komo en dispose également de 6 sites.

1.2. Mode opératoire

▪ Matérialisation des placettes

Deux observateurs munis d'un ruban fluo, d'un décimètre de 200 m de long et d'une boussole de précision matérialisaient le transect. L'opération consistait à faire une ligne la plus droite possible à l'aide de la boussole. Ainsi, à chaque 20 m, les deux observateurs attachaient le ruban

fluo pour indiquer le centre de chaque placette. Pendant ce temps, une deuxième équipe de deux personnes munies d'une craie et d'une ficelle ayant deux nœuds, un à 2 m et un autre à 7 m, formaient les placettes circulaires. L'un des observateurs se tenait au centre de la placette, et l'autre tirait la ficelle de 7 m en faisant un cercle. Tous les arbres, qui étaient touchés par la ficelle de 7 m, étaient marqués à la craie.

- Mesure des paramètres

Le diamètre de chaque arbre a été collecté avec le mètre forestier. La norme DBH a été appliquée pour les *Avicennia germinans*, *Conocarpus erectus* et *Laguncularia racemosa*. Pour *Rhizophora harrisonii* et *racemosa*, nous avons mesuré à 30 cm au-dessus de la dernière racine. Les hauteurs de chaque arbre ont été prises avec un Suntto laser. La technique consistait à se placer à une distance raisonnable, et à observer l'arbre à 1,30 m de hauteur et à la cime avec le laser. Ainsi, la hauteur de l'arbre était automatiquement déduite par l'appareil. Le GPS nous a permis de prendre la position géographique de chaque arbre. Et la sonde multiparamètre a permis de prélever les paramètres physico-chimiques : le pH, la salinité, l'oxygène dissous, la conductivité, la température ; et l'altitude par rapport au niveau de la mer a été obtenue (Annexe 1, p. 231).

- Aliquotes

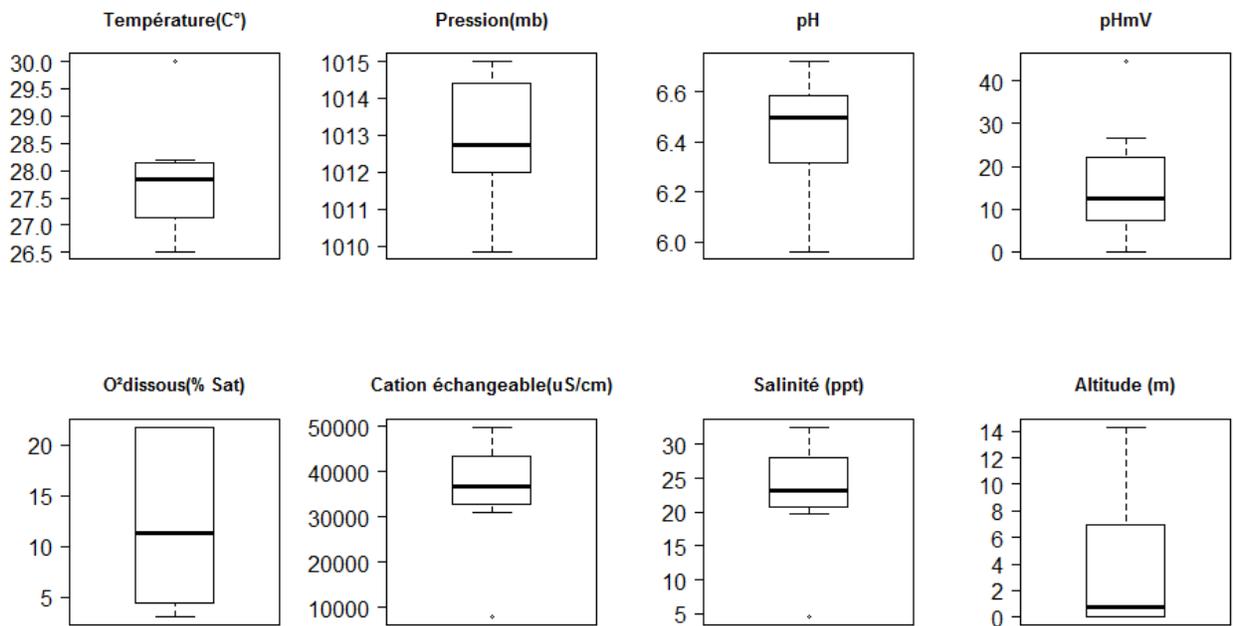
L'infradensité de bois est un paramètre essentiel dans l'élaboration des équations allométriques, selon la méthode de facteur forme (Husch et al., 2003 ; Picard et al., 2012). A cet effet, des aliquotes ont été recueillies sur un site caractéristique de l'estuaire de la Mondah. Le choix de ce site, pour le prélèvement des aliquotes, est motivé par le fait que celui-ci à l'avantage de regrouper plusieurs espèces (*Rhizophora racemosa*, *Rhizophora harrisonii* et *Avicennia germinans*). Il regroupe les individus de gros et petit DBH. D'abord des placettes, de référence carrée 10 m x 10 m, ont été matérialisées avec le décamètre et des ficelles. Ensuite, les hauteurs des arbres ont été prises à partir d'un télémètre laser. Celles des racines ont été prises à l'aide d'une perche graduée. Le ruban forestier a servi dans la mesure du DBH du tronc et des racines. Les arbres mesurés ont été marqués à la peinture rouge. Les aliquotes ont été prélevées au niveau du tronc et des racines, sur 158 individus, à l'aide d'une scie à bois.

2. Analyse des données de terrain

2.1. Données physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques, que sont la pression (mb), la salinité (ppt), la température (°C), l'oxygène dissous (% Sat), les cations échangeables ($\mu\text{S}/\text{cm}$) et l'altitude (m), se présentent en unité de mesure et de grandeurs différentes, sans oublier le pH et pHmV qui n'ont pas d'unité de mesure. Ainsi, par exemple le pH est exprimé en unité de dizaine, la température en unité de centaine et les cations échangeable en unité de dix millièmes (Figure 9, ci-après).

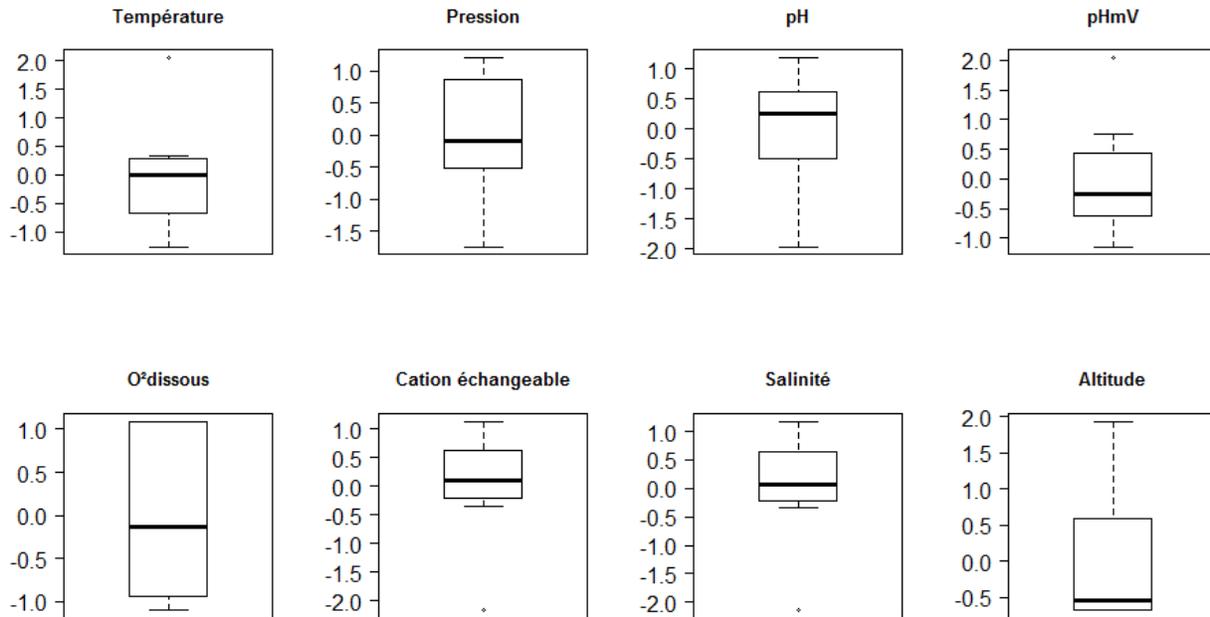
Figure 9 : Distribution descriptive des paramètres physico-chimiques avant l'harmonisation d'unité



Source : Igor Akendengué Aken, 2020.

Dans ce cas de figure, Legendre et *al.*(1998) préconisent d'harmoniser les paramètres physico-chimiques par le biais d'une transformation d'Hellinger. Celle-ci est favorable à la transformation des variables physico-chimiques environnementales. À partir de cet instant, les paramètres physico-chimiques transformés sont celles qui vont permettre de déterminer le gradient environnemental de telle ou telle variable sur l'abondance des espèces, et le stock de biomasse de carbone (Figure 10, ci-après).

Figure 10: Distribution descriptive des paramètres physico-chimiques après l'harmonisation d'unité



Source : Igor Akendengué Aken, 2020.

2.2. Détermination des densités du bois

D'abord, les aliquotes ont été coupées en forme régulière cubique. La longueur, la largeur et la hauteur ont été mesurés. Afin de déterminer la masse humide, les aliquotes ont été pesées au Laboratoire des Sciences Naturelles de l'École Normale Supérieure (ENS) de Libreville. Ensuite, elles ont été mises dans une étuve, au Laboratoire de l'Institut Recherche Agronomique et Forestière (IRAF), à une température constante de 70° C pendant 48 h. Enfin, elles ont été pesées à nouveau pour déterminer la masse sèche. Le volume sec et la densité sèche ont été calculés selon les formules suivantes :

$$V=h*L*l.....(1)$$

ou V=volume. L=longueur. l=largeur et h=épaisseur.

- Infradensité de chaque arbre

$$p(g/cm^3) =M/V.....(2)$$

ou p= infradensité, M= masse sèche de chaque échantillon.

- Calcul de la surface terrière

La surface terrière individuel de chaque arbre a été déterminée selon la formule classique.

$$(g) = \pi * d^2 / 4 \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{Volume (v) en m}^3 = g * h * f \dots \dots \dots (4)$$

(π) vaut 3,14, d= diamètre en mètre (m), g= surface terrière en $m^2 ha^{-1}$, h représente la hauteur en mètre (m) et f = facteur forme (f=0,6).

3. Méthode d'estimation des modèles allométriques au sol

3.1. Modèle allométrique au sol

- ✓ Forme de modèle examinée pour la détermination des volumes

Vue la particularité dendrométrique des mangroves estuariennes au Gabon, il était nécessaire de mettre en place des équations locales d'estimation de biomasse aérienne. Il existe deux grandes familles d'outils de prédiction de volumes: les formules analytiques et les formes facteurs (Husch et *al.*, 2003). La première est basée sur les formules de Smalian, Hubert et Newton. Le modèle de Smalian surestime la mangrove, celui de Hubert sous-estime et celui de Newton plus exact prend en compte les paramètres non accessibles dans les mangroves. Ceci-étant, nos estimations de volumes reposent sur la méthode standard dite forme facteur de Husch et *al.* (2003). Il existe plusieurs formes d'équation allométrique de prédiction de volume, et nombreuses d'entre elles ont été adaptées à l'estimation des volumes de mangroves par Ajonina (2008) ; cf. équations 5 à 14.

- Régression linéaire simple

$$V = b_0 + b_1 D^2 \dots \dots \dots (5)$$

$$V = b_0 + b_1 D^2 H \dots \dots \dots (6)$$

- Régression linéaire multiple

$$V = b_0 + b_1 D^2 + b_2 H \dots \dots \dots (7)$$

$$V = b_0 + b_1 D^2 + b_2 D^2 H \dots \dots \dots (8)$$

$$V = b_0 + b_1 D^2 H + b_2 H \dots \dots \dots (9)$$

- Modèle quadratique

$$V=b_0 + b_1D+b_2D^2.....(10)$$

- Modèle logarithmique transformé

$$\log V=b_0 + b_1D.....(11)$$

$$\log V=b_0 + b_1\log D.....(12)$$

$$\log V=b_0 + b_1\log D+b_2\log H.....(13)$$

$$V=b_0 + b_1\log D.....(14)$$

Où, V= volume (m^3)

D=diamètre à hauteur de poitrine (cm)

H= hauteur en (m)

b_0, b_1, b_2 sont les coefficients respectifs des modèles de régressions.

NB-

Ces mêmes formes d'équation ont servi dans la mise en place des équations allométriques de biomasse. Dans ce contexte, la variable volume est remplacée par biomasse (AGB). Par contre, les équations allométriques de prédiction de biomasse à partir de la hauteur terrain sont calibrées selon les modèles 34 ; 35 ; 36 et 37. La variable hauteur est indépendante, et AGB la variable dépendante.

3.2. Méthode de détermination des paramètres

Les paramètres des modèles de régression ont été déterminés par la méthode de moindres carrés. Et cela, sur la base de deux jeux de données indépendants, dont un pour la modélisation (60 %) et l'autre de pour la validation (40 %).

$$a = \frac{\text{cov}Y;Y'}{V(Y)} = \frac{\bar{Y}Y' - \bar{Y}.\bar{Y}'}{\bar{Y}^2 - (\bar{Y})^2}.....(15)$$

$$b = \bar{Y}' - a.\bar{Y}.....(17)$$

- ✓ Propriété statistique d'appréciation des modèles

L'ensemble des modèles allométriques au sol sera apprécié selon trois critères statistiques et un critère visuel : la distribution des résidus. Nous avons utilisé comme critère statistique le r^2 , AIC et SEE.

$$r^2 = \frac{\text{cov}Y_i Y'_i}{\sqrt{V(Y)} \cdot \sqrt{V(Y')}} \dots \dots \dots (18)$$

$$\text{AIC} = -2 \log p + 2q \dots \dots \dots (19)$$

Où P = vraisemblance maximisée et q le nombre de paramètres dans le modèle.

3.3. Validation des modèles

La comparaison de la variable prédite et la variable observée permet de valider les modèles (Chave et al., 2005). Cette technique été utilisée aussi bien pour le volume, la hauteur et la biomasse. Peu importe le type de modèle : allométrique au sol ou allométrique par télédétection:

$$\text{RMSE} = \frac{1}{N} \sum_1^n ((P_i - O_i)^2) / N * 0,5 \dots \dots \dots (20)$$

$$\text{BIAIS} = \frac{1}{N} \sum_1^n (P_i - O_i) \dots \dots \dots (21)$$

$$\text{BIAIS}(\%) = \frac{1}{N} \sum_1^n (P_i - O_i) / \text{absolue}(O_i) \dots \dots \dots (22)$$

Où RMSE = racine carrée de l'erreur quadratique moyenne, P = biomasse prédite et O = biomasse observée. La RMSE est utilisée dans la mesure de dispersion des prédictions par rapport aux observations. Le coefficient de détermination (r^2) et le critère d'information d'Akaike (AIC) ont servi dans la sélection des modèles adéquats.

3.4. Biomasse aérienne (AGB) et carbone aérien (AGC)

3.4.1. Biomasse aérienne (AGB)

La biomasse, quant à elle, a été obtenue par la formule standard de Husch et al.(2003). Biomasse aérienne.

$$\text{AGB} = p * v * \text{BEF} \dots \dots \dots (23)$$

où p = infradensité, et BEF = facteur d'expansion de biomasse dans les mangroves déterminé à 1.18 (Ajonina, 2008).

3.4.2. Méthode d'estimation du carbone aérien

En règle générale, la biomasse d'un arbre est constituée d'azote, 6% d'hydrogène, 43% d'oxygène et 50% de carbone (Trouy, 2015). Cette règle est aussi vraie pour les forêts de mangroves (Brown, 1999 ; Ajonina, 2008 ; Kauffman et *al.*, 2011). Cela revient à dire que les estimations de biomasse sont multipliées par 0,5 pour convertir la biomasse en carbone. Le carbone sera multiplié par 3,67 pour obtenir le dioxyde carbone. Ainsi, le modèle d'estimation de biomasse est le suivant :

$$AGB = a * D^b \dots\dots\dots(24)$$

$$C = (a * D^b) * 0,5 \text{ ou encore } AGB * 0,5 \dots\dots\dots(25)$$

$$CO^2 = \{(a * D^b) * 0,5\} * 3,67 \text{ ou encore } C * 3,67 \dots\dots\dots(26)$$

4. Méthode d'estimation de modèle par télédétection

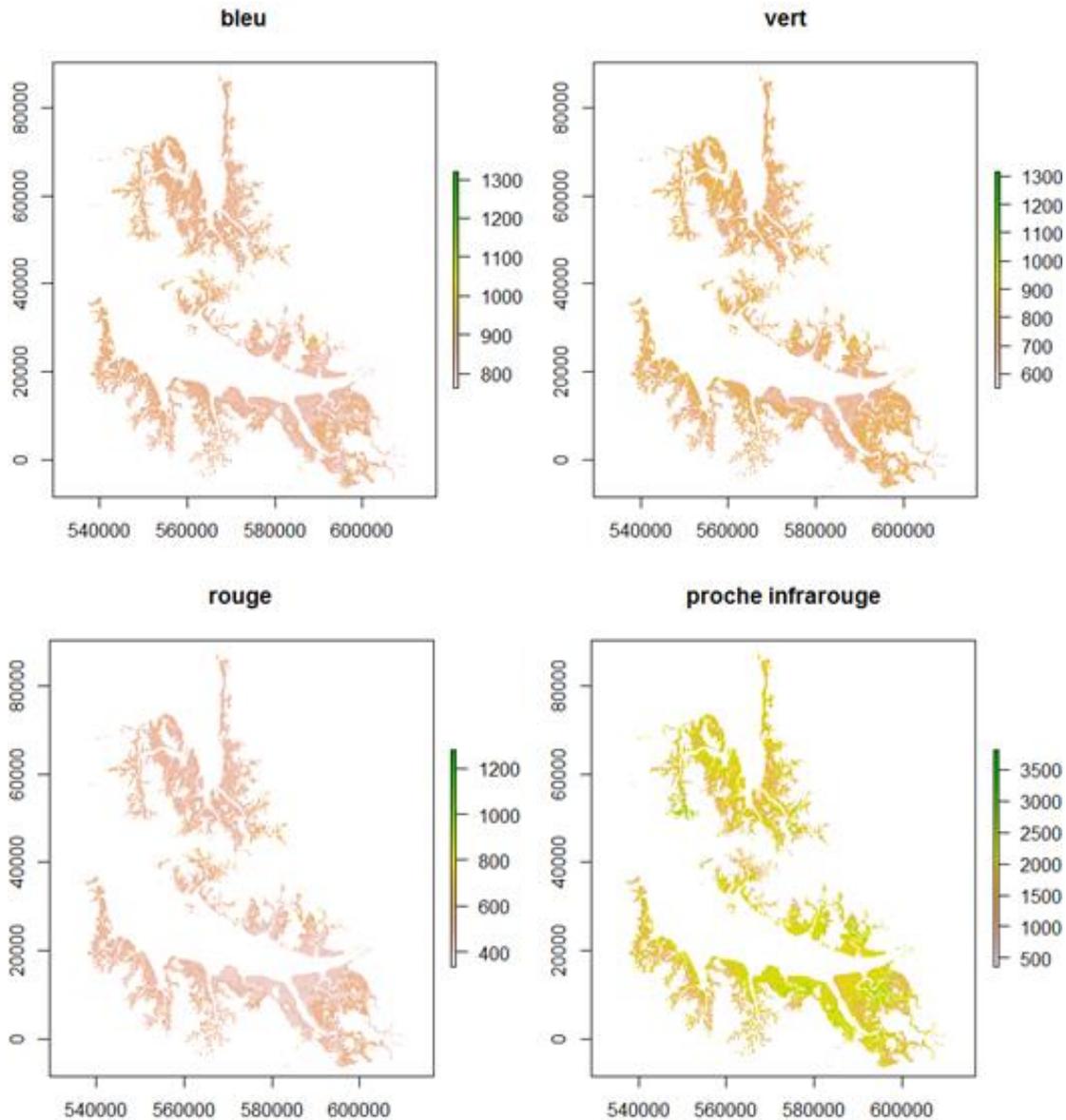
4.1. Prétraitement et traitement de l'image

L'estimation de la biomasse forestière est un exercice dont la difficulté est fonction du type de forêt et de la superficie à couvrir. A l'échelle des deux ou trois arbres, deux personnes suffiront. A l'échelle d'une ou de plusieurs parcelles, cela nécessite plusieurs équipes avec un matériel adéquat. Quand il s'agit des grandes étendues forestières, le travail devient fastidieux, coûteux et demande plus de temps.

4.1.1. Prétraitement

Les images satellitaires sont essentiellement de Sentinel 2A. Elles ont retenu notre attention du fait qu'elles ont une résolution spatiale comprise entre 10 et 60 m. Par l'opération de correction géométrique appelée *sharpening* dans SAGA Gis, toutes les bandes ont été ramenées à cette résolution de 10 m. Nous avons également utilisé les images SRTM 30 m et les données LiDAR LVIS. Les données de télédétection optique et radar ont été obtenues sur le site USGS <https://earthexplorer.usgs.gov> au format GEOTIFF (Figure 11, ci-après).

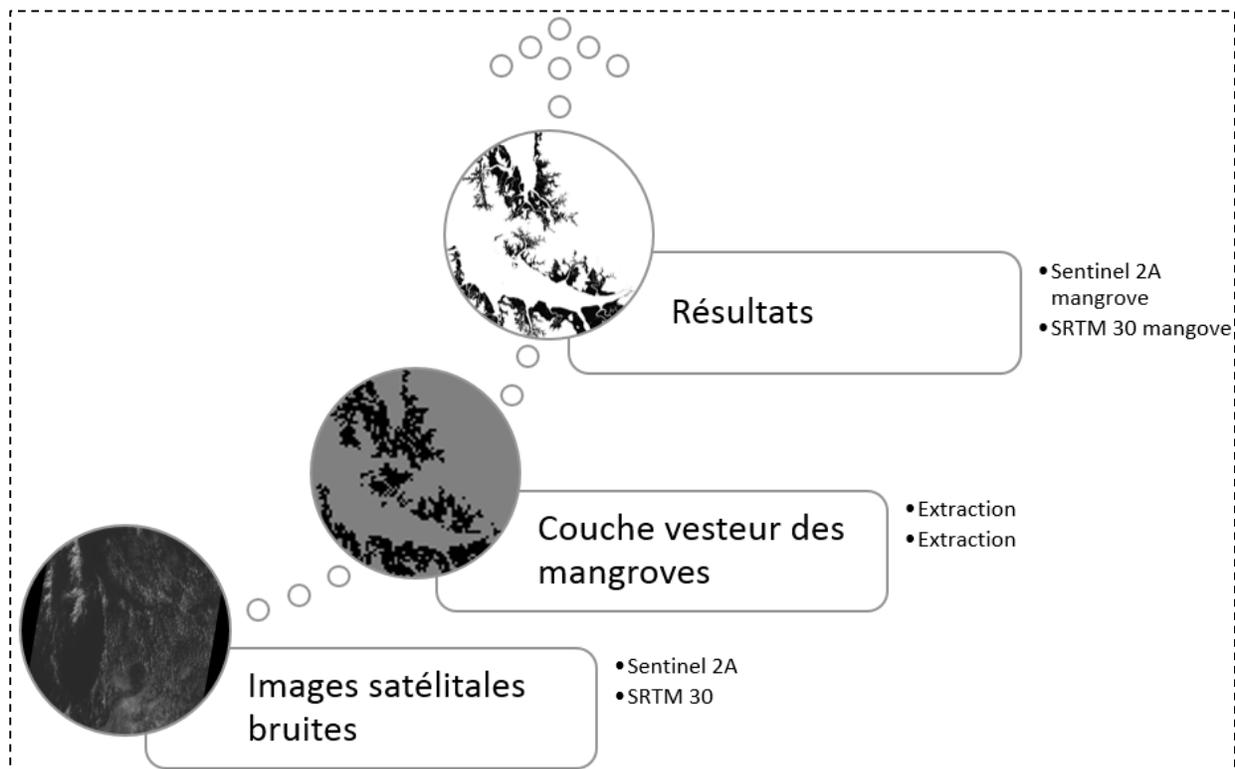
Figure 11: Les différentes bandes d'image satellitaire utilisée



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020

La classe des mangroves a été extraite des autres classes d'occupation du sol (Figure 12, ci-après). Dans la suite, cette couverture de mangrove a servi au découpage de toutes les bandes utiles, y compris le SRTM. Cette procédure a permis de rendre les traitements plus rapides. Les données LiDAR, ayant servi à la validation des cartes de hauteur, ont été téléchargées à l'adresse <https://ivis.gsfc.nasa.gov/Data/Maps/Gabon2016Map.html>.

Figure 12 : Protocole d'extraction du SRTM des mangroves



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

4.1.2. Traitement d'image

Deux approches ont servi dans le traitement d'image : l'approche dite douce, qui consiste à tester la prédiction de la biomasse par l'indice de végétation (Winarso et *al.*, 2015; Frampton et *al.*, 2013) ; (Équations 27 à 32), et l'approche complexe. Celle-ci a consisté à prédire la biomasse par paramètre dendrométrique, notamment la hauteur des arbres. Or, aucun paramètre dendrométrique par télédétection n'était disponible *à priori* à partir des images optiques. Cela suppose d'abord la mise en place d'un modèle de prédiction d'une ou de plusieurs variables dendrométriques. La variable dendrométrique la plus facile à élaborer, avec le type de donnée disponible, est le modèle de prédiction de hauteur des mangroves par télédétection. Pour ce faire, il y a deux possibilités :

- ✓ la première consiste à la mise en place d'un modèle de canopée, en soustrayant le modèle numérique d'élévation (ASTER) du modèle numérique de surface (SRTM). Ainsi, la donnée obtenue constituera le sursol, donc la hauteur des arbres (cf. Équations 32 à 35) ;

- ✓ la deuxième consiste à l'élaboration d'un modèle de prédiction de hauteur de mangrove, à partir d'un croisement entre les hauteurs prélevées sur le terrain et l'élévation topographique obtenue par le SRTM. Celui-ci contient à la fois l'élévation topographique et le sursol, donc la hauteur des arbres.

Chacune de ces possibilités a ses avantages et ses inconvénients. La première est désavantageuse dans le cas de mangroves naines et à individus espacés. Elle est par contre très avantageuse dans les mangroves de grande taille et aux individus peu espacés. La deuxième possibilité a l'avantage de répondre aux deux situations sus-évoquées; mais, elle a le désavantage de répondre à une classe de hauteur bien précise, en fonction de la plage de hauteur ayant permis de calibrer le modèle de départ à partir du SRTM (cf. Équations 36 à 38).

4.2. Forme d'indice de végétation et modèle examiné

Sur la base de la biomasse terrain, il a été question de tester des modèles qui soient capables de prédire la biomasse à partir des indices de végétation (Rouse et *al.*, 1973 ; Deering et *al.*, 1975 ; Richardson et Wiegand, 1977 ; Perry et Lautenschlager, 1984 ; Huete, 1988 ; Thiam, 1994). Ces indices se basent sur la différence de réflectance de chlorophylle entre le proche infrarouge du spectre électromagnétique (PIR) et le rouge (R). A cet effet, par exemple le NDVI qui varie entre [-1 et 1] sera très proche ou égale à 1 en forêt dense, ou égale à -1, ou pas, en forêt inondée et proche de 0 dans les zones de sol nu ou zone de forêt peu dense. Ainsi, dans la pratique, pour déterminer la biomasse à partir des images satellites, les coordonnées de chaque arbre ont été projetées sur les images, afin d'extraire les valeurs des indices correspondantes à chaque coordonnée. Ensuite, les valeurs des indices de chaque arbre ont été regroupées en valeur moyenne par placette. Car, leurs sommations donneraient une valeur d'indice au-delà de la plage de réflectance du NDVI des mangroves.

$$DVI = NIR - R \dots\dots\dots (27)$$

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \dots\dots\dots (28)$$

$$RVI = R / NIR \dots\dots\dots (29)$$

$$RVI = [abs(NDVI) + 0.5]^{0.5} \dots\dots\dots (30)$$

$$TVI = [(NIR - R) / (NIR + R) + 0.5]^{0.5} \dots\dots\dots (31)$$

$$\text{GNDVI} = (\text{NIR} - \text{V}) / (\text{NIR} + \text{V}) \dots\dots\dots (32)$$

$$\text{MNC} = \text{SRTM-ASTER} \dots\dots\dots (33)$$

$$\text{NDTH} = \text{NDVI} * \text{MNC} \dots\dots\dots (34)$$

$$\text{HNDVI} = \text{H} * \text{NDVI} \dots\dots\dots (35)$$

Ensuite, un corrélogramme a été établi à partir du seuil de 0,9 pour discriminer le grand nombre d'indices. Seules les indices associés à aux SRTM ont un coefficient de corrélation au seuil de 0,9.

Ce constat a conduit donc à explorer la possibilité de prédiction de la biomasse et le carbone à partir du SRTM. Comme le SRTM représente la hauteur topographique associée à la hauteur des arbres, il convenait de d'abord dissocier la topographie de dans les valeurs de hauteur du SRTM. Sur la base de données de hauteur d'arbre individuel et les données de moyennes de hauteurs de chaque placette ont été croisés avec le SRTM. Cette opération d'extraction a conduit la mise en place d'un modèle de prédiction de hauteur des mangroves à partir du SRTM.

- Régression linéaire simple

$$\text{H} = \text{b}_0 + \text{b}_1 \text{SRTM}^2 \dots\dots\dots (36)$$

- Modèle logarithmique transformé

$$\log \text{H} = \text{b}_0 + \text{b}_1 \text{SRTM} \dots\dots\dots (37)$$

$$\log \text{H} = \text{b}_0 + \text{b}_1 \log \text{SRTM} \dots\dots\dots (38)$$

- ✓ Méthode de détermination des paramètres

Les paramètres de modèles de télédétection ont été également déterminés par la méthode de moindre carrée, à partir d'une base de données de 1420 individus (63,36%) pour la modélisation.

3.5. Paramètre de validation des modèles

La validation des modèles en télédétection s'est faite également par comparaison entre la variable prédite et la variable observée sur la base de données indépendante de 821 individus (36,64%) tirés de l'échantillonnage de la NASA dans la même région. Ceci a été rendu possible

par RMSE, BIAIS, BIAIS (%) , dont les formules ont déjà été mentionnées dans le cadre de la validation des équations allométriques au sol.

✓ Biomasse aérienne

Sur la base de données de hauteur d’arbre individuelle, et les données de moyennes de hauteurs de chaque placette ont été croisées avec la hauteur estimée à partir du SRTM (H_{SRTM}), pour calibrer un modèle de prédiction de biomasse par télédétection dans les familles des équations 39 à 41.

- Régression linéaire simple

$$AGB=b_0+b_1X^2.....(39)$$

- Modèle logarithmique transformé

$$\log AGB=b_0+b_1X.....(40)$$

$$\log AGB=b_0+b_1\log X.....(41)$$

Où AGB est la biomasse aérienne et X sera respectivement, H_{SRTM} ; MNC ; NDTH et HNDVI.

4.3. Validation du modèle de prédiction par télédétection

Deux types de données, primaires et secondaires, ont été utilisés. La première catégorie est constituée de : éléments dendrométriques (DBH, hauteur et volume), éléments physico-chimiques (pH, salinité, pression atmosphérique, température, oxygène dissout, conductivité), coordonnées géographiques de chaque arbre et aliquotes au tronc et des racines, échantillons de sol, images satellitaires optique, LiDAR et radar. La deuxième catégorie, quant à elle, a été déduite des données primaires en laboratoire, notamment les poids sec et humide des aliquotes et les échantillons de sol, la surface terrière, le volume et l’infradensité du bois, les indices de végétation, les équations allométriques au sol et par télédétection. Ces données différentes sont agencées dans une certaine logique, afin d’aboutir à la spatialisation de la biomasse et du carbone et même du dioxyde de carbone des mangroves estuariennes du Gabon (Figures 13 à 15, ci-après).

5. Modèle de distribution

5.1. Détermination des paramètres des modèles de distribution

Les paramètres de chaque distribution ont été déterminés à partir de la méthode dite maximum de vraisemblance. Ainsi, nous avons choisi de prendre les modèles couramment utilisés en foresterie : Gamma, Weibull et Log-normale (Husch et al., 2003 ; Ajonina, 2008) ; cf. Equations 38 à 41.

Distribution Log-normale

$$f(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} X^{-1} \exp\left[-\frac{1}{2}(\ln X - \mu)^2 / \sigma^2\right] \dots\dots\dots(42)$$

Où $X, \sigma > 0$ $\ln X$ = Logarithme naturel de X .

Distribution Gamma

$$f(X) = \frac{\lambda^n}{\Gamma(n)} X^{n-1} e^{-\lambda X} \dots\dots\dots(43)$$

$X > 0$
 $n \geq 1$
 $\lambda > 0$

Où la moyenne est $\bar{X} = \frac{n}{\lambda}$ la variance, $\sigma^2 = \frac{n}{\lambda^2}$

Distribution Weibull

$$f(Y) = (\alpha/b)(Y/b)^{\alpha-1} \exp\left[-(Y/b)^\alpha\right] \dots\dots\dots(44)$$

Où : α = la forme, b = le paramètre de l'échelle.

Distribution exponentielle

$$f(Y) = \alpha \exp\left[-\alpha X\right] \dots\dots\dots(45)$$

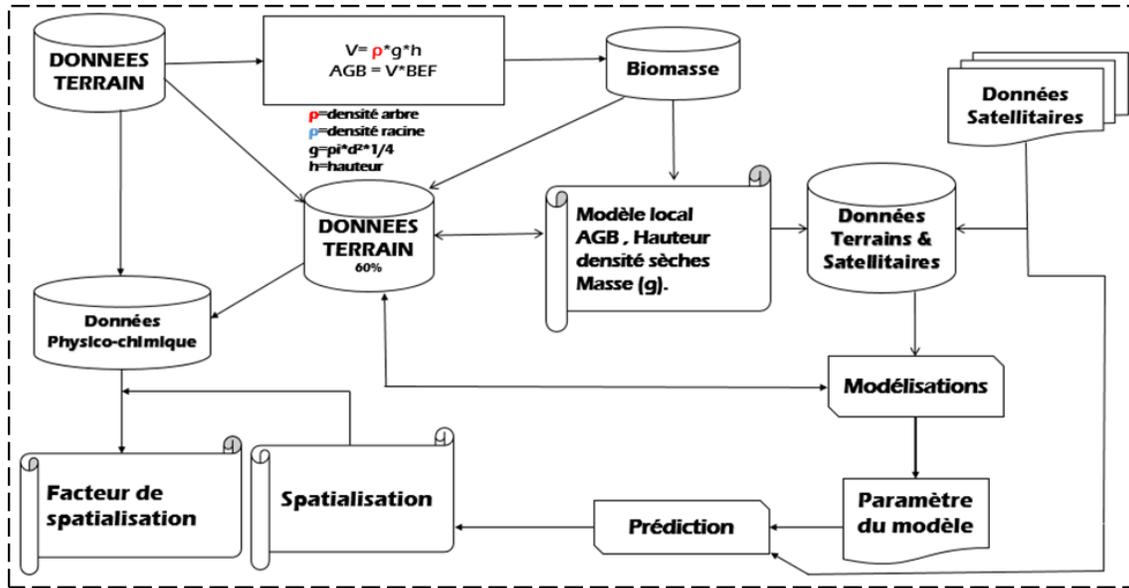
avec $\alpha > 0, X > 0$.

5.2. Propriété statistique d'appréciation des modèles

Les modèles de distribution ont été appréciés à partir des critères statistiques AIC, BIC, Kolmogorov Smirnov, Cramer-Von Mises et Anderson Darling.

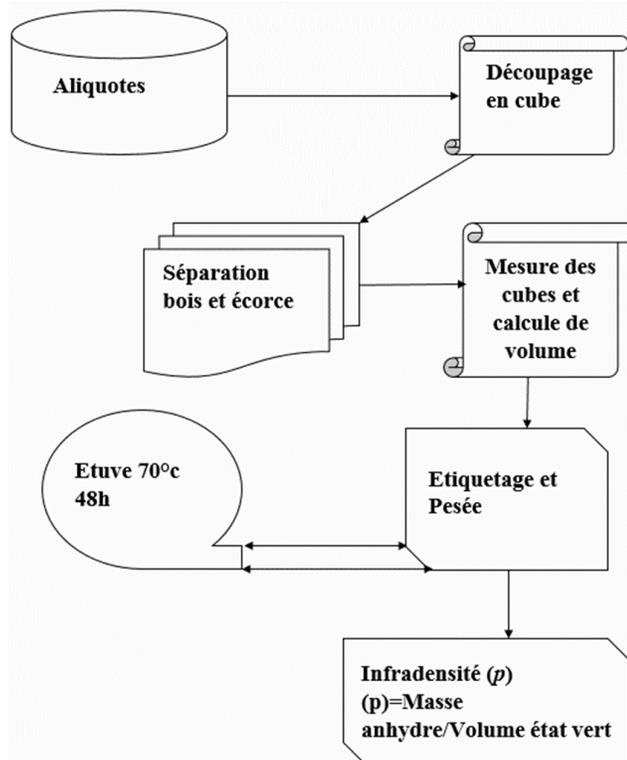
$$BIC = -2 \log p + q \cdot \log(N) \dots\dots\dots(46)$$

Figure 13: Les grands axes de traitement de données



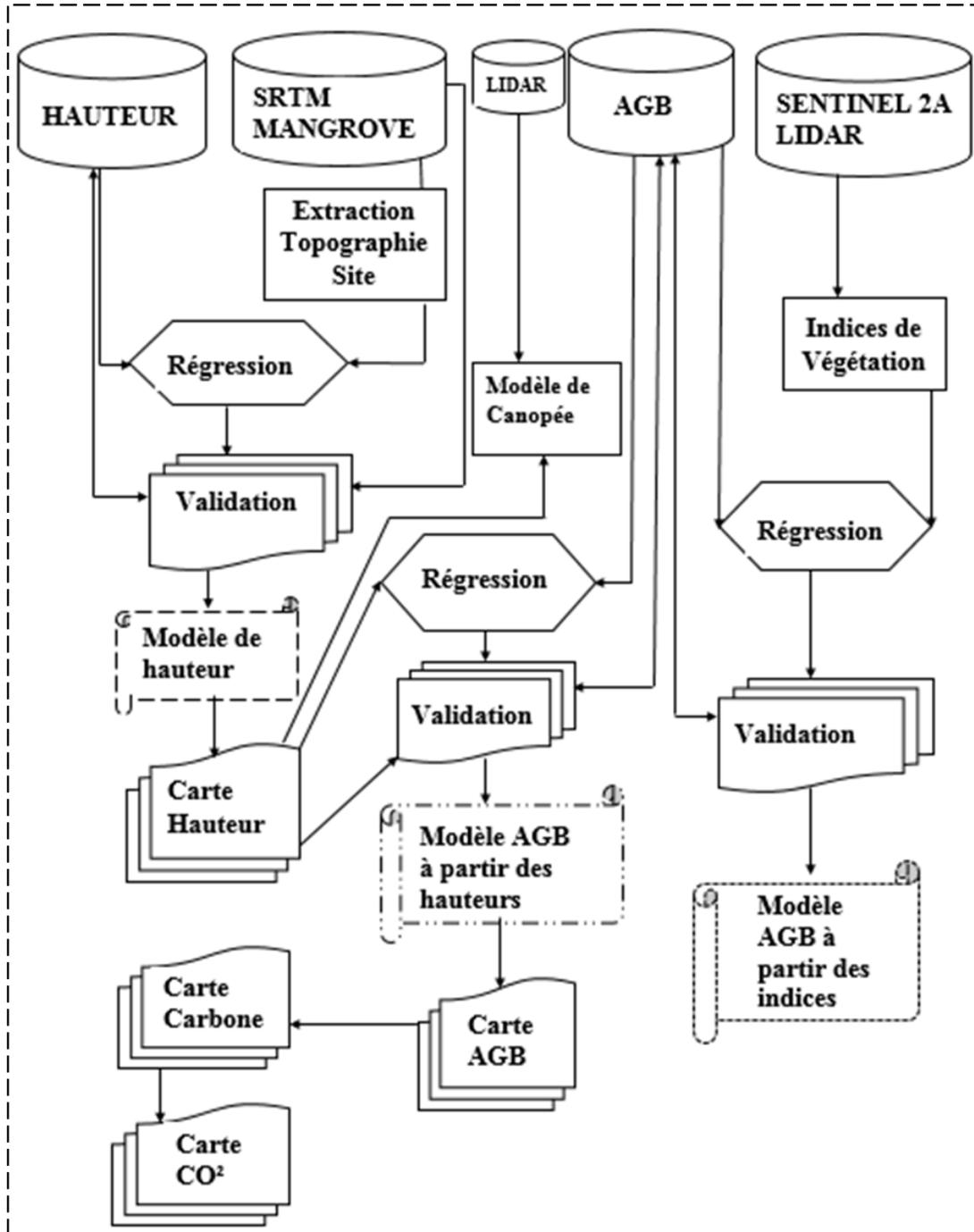
Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020. NB : Les lettres en rouge (2) et en bleu (1) représentent les densités du bois qui ont été préalablement déterminées dans le cadre de cette étude.

Figure 14: Procédure de l'établissement de la densité du bois



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Figure 15 : Procédure de méthodologie générale



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Les Hauteurs et SRTM des mangroves aboutissent sur une équation d'estimation des hauteurs de mangroves à partir du SRTM. Les hauteurs de mangroves, quant à eux, permettront d'obtenir la biomasse de mangrove par télédétection. La biomasse ainsi obtenue permet d'obtenir la carte de carbone, ainsi que de dioxyde de carbone.

En conclusion, quatre types de données ont été collectés directement sur le terrain : les données physico-chimiques, dendrométriques, géographiques et celles liées aux propriétés physiques du bois. De ces données primaires ont découlé des données secondaires obtenues en laboratoire. Il s'agit des infradensités du bois par espèce emblématique, des équations allométriques de volume, hauteur, biomasse et carbone au sol et de hauteur, biomasse et carbone par télédétection. Aussi, les techniques de régression linéaire et non linéaire ont occupé une place de choix. A ceci s'ajoutent les modèles de distribution de DBH de type normale, Log-normale, Gamma, Weibull et de type exponentiel utilisé pour calibrer des modèles de distribution de DBH de mangrove en milieu anthropisé et non-anthropisé.

Outre les données acquises directement sur le terrain, ou en laboratoire, les données satellitaires notamment sentinel 2 A, LiDAR (SRTM 30 x 30, NASA 2000) ont constitué une autre source d'informations indispensables à cette étude. Comme pour les données directement acquises sur le terrain.

Cette partie, relative au cadre physique de la région d'étude, au matériel et aux méthodes de recherches ou d'investigations utilisées, va être suivie par ce qui a trait à la modélisation des équations allométriques et à la spatialisation de la biomasse et du carbone par télédétection.

**Partie II : MODÉLISATION ET SPATIALISATION DE
LA BIOMASSE ET DU CARBONE PAR TÉLÉDÉTEC-
TION**

Nous avons présenté les aspects physiques du site d'étude et les généralités sur la biomasse et le carbone sous ses différentes formes, ainsi que les fondements de la théorie du géosystème de V. B. Sochava (chapitre I) et les méthodes d'étude. Celles-ci ont consisté en la présentation de la collecte des données, des modèles explorés aussi bien au sol et de télédétection, en passant par les modèles de distributions de diamètre (DBH) (chapitre II). L'objectif n'est plus seulement de montrer les différents modèles, qui ont été explorés. Il convient maintenant de se pencher sur les modélisations des équations allométriques, aussi bien au sol que par télédétection, à partir des ressources d'image optique, radar, et lidar disponibles.

En cela, cette partie intitulée « Modélisation et spatialisation de la biomasse et du carbone par télédétection » comporte deux chapitres. Le premier chapitre porte sur l'élaboration des équations allométriques du peuplement des mangroves. Ce chapitre comporte trois grands points. Le premier point traite des équations allométriques de prédiction des hauteurs par espèces. La deuxième partie du chapitre est vouée aux équations allométriques de prédiction de volume par espèce. Et, enfin, le troisième point de ce chapitre est consacré aux équations allométriques de prédiction de la biomasse par espèce.

Le second chapitre est axé essentiellement sur les équations allométriques par télédétection. Ce chapitre est également articulé en trois points. Le premier point fait état des équations allométriques d'estimation de hauteur des mangroves par télédétection grâce au srtm qui est une donnée radar. Le deuxième point du chapitre, quant à lui, traite des indices de végétation susceptible de prédire la biomasse par télédétection optique, mais cette méthode a montré ses limites. Et enfin, le troisième point traite des équations allométriques portant sur l'estimation de la biomasse et du carbone par télédétection radar.

CHAPITRE III: Équation allométrique du peuplement des mangroves

Les équations allométriques sont des outils qui permettent de prédire la biomasse ou le carbone du ligneux ou non ligneux à partir des éléments dendrométriques faciles à prélever sur le terrain (Picard et *al.*, 2012). Elles sont donc au centre du processus de suivi de la biomasse et du carbone forestier au sol. Le prélèvement de plusieurs paramètres (hauteur, DBH) d'un *Rhizophora*, ou d'un *Avicennia*, n'est pas toujours aisé surtout sur de grandes surfaces ; d'où la nécessité de faire recours aux équations allométriques. Toutefois, il va falloir qu'elles existent, pour la région d'étude et pour les espèces d'intérêt. Même quand elles existent, elles peuvent ne pas convenir en fonction du DBH de calibrage d'origine.

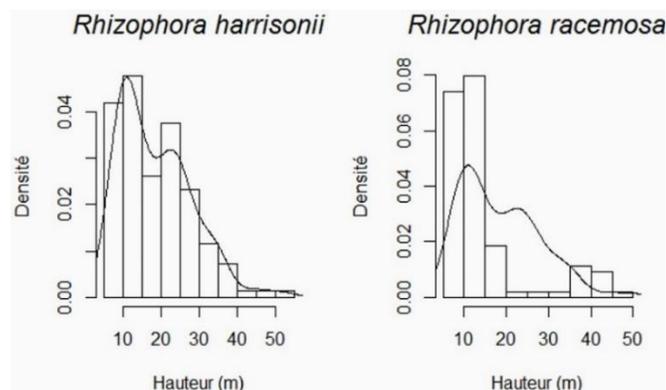
1. Équations de hauteur

1.1. Classe de hauteur

L'ensemble de la classe de hauteur de *Rhizophora harrisonii* varie de [5,80 m à 52,50 m]. Pour *Rhizophora racemosa*, la hauteur varie entre [5,10 m à 48 m].

Rhizophora harrisonii présente une prédominance des individus des classes [10 - 15[et [5-10[. L'abondance ne diminue pas de manière uniforme avec l'accroissement de hauteur jusqu'à la classe [25-30]. À partir de 40 m de hauteur, les densités deviennent inférieures à 0,01. Aussi, y-a-il une rupture de tendance marquée par une baisse brusque d'individus dans la classe [15- 20[, (Histogramme 3, ci-après).

Histogramme 3 : Distribution des hauteurs du genre *Rhizophora*



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Cette espèce a une moyenne de $18,59 \pm 0,80$ m et une amplitude 46,70 m. Cette espèce a une moyenne de $18,59 \pm 0,80$ m et un amplitude 46,70 m. *Rhizophora racemosa* a également une prédominance dans la classe [10 - 15[. Entre 20 et 35 m, les densités sont inférieures à 0,01. Ensuite, une hausse supérieure à 0,01 s'observe au niveau des classes [35 - 40[et [40 - 45[, avant de rechuter à une densité inférieure à 0,01 dans la classe [45-50]. Avec une moyenne de $14,77 \pm 0,95$ m et une amplitude 42,90 m, *Rhizophora racemosa* est moins grand que *Rhizophora harrisonii* (Tableau 3, ci-après). Dans l'ensemble les deux histogrammes marquent une asymétrie vers la droite avec une prédominance des arbres ayant des petites hauteurs.

Tableau 3 : Statistique descriptive des espèces ayant bénéficiées de la mise en place d'un modèle d'estimation de hauteur

Paramètres	<i>Rhizophora harrisonii</i>	<i>Rhizophora racemosa</i>	<i>Avicennia germinans</i>	<i>Rhizophora spp</i>
n	56	15	55	25
Min	1,1	3,2	2,5	2
Max	41,6	52,5	24	16
Moyenne	6,97	16,71	13,28	6,52
Ecart-type	7,56	14,74	4,93	3,89
Erreur standard	1,01	3,8	0,66	0,77

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

1.2. Estimation des modèles des hauteurs

Vingt modèles de hauteur ont été ajustés en raison de 4 modèles par espèce. Les r^2 ajustés des modèles généraux varient entre 0,48 et 0,79 et les AIC entre 168 et 959. Selon les critères r^2 ajusté, erreur standard estimée (SEE), le meilleur modèle est l'équation 3 de type puissance avec respectivement 0,79 de r^2 ajusté, 0,42 SEE et 168 AIC. Tandis que le deuxième meilleur modèle a un r^2 ajusté de 0,50, 5,71 et un AIC de 959 (Tableau 4, ci-après).

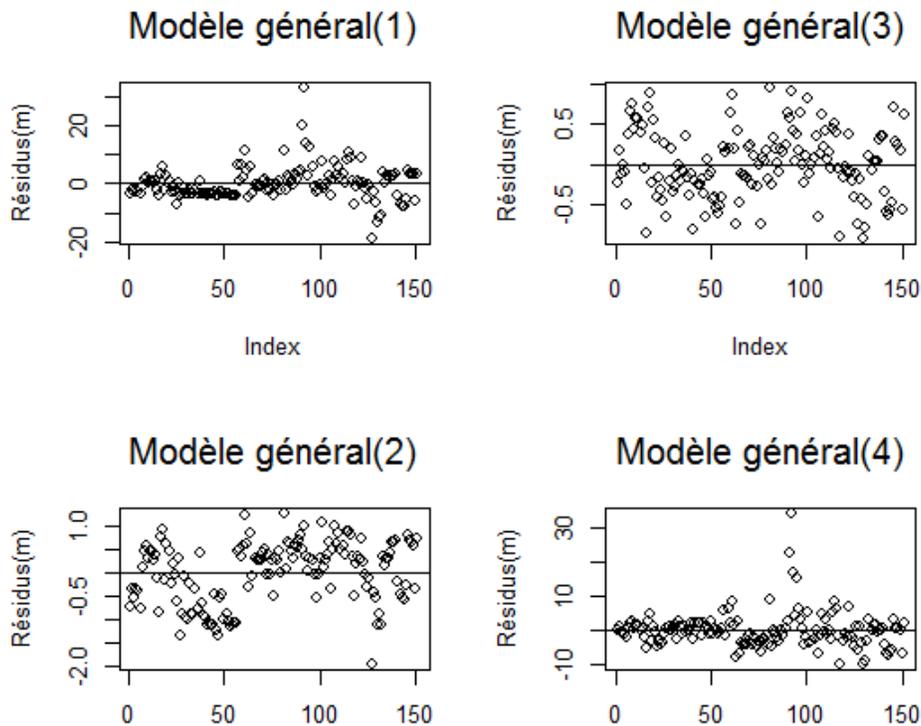
Tableau 4 : Paramètres d'appréciation du modèle de prédiction générale des hauteurs

Equations générales	n	α	b_1	R^2	R^2_{adj}	SEE	p-value	AIC
1	151	4,64	0,24	0,51	50	5,71	2,2e-16	959
2	151	1,36	0,02	0,48	0,47	0,65	2,2e-16	306
3	151	1,3	0,68	0,79	0,79	0,42	2,2e-16	168
4	151	-3	5,26	0,59	0,59	5,19	2,2e-16	929

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Le choix d'un modèle à partir des résidus est basé sur la symétrie des résidus par rapport à l'axe $y=0$ et la distribution aléatoire des résidus. Ainsi, le modèle général (1) a des résidus entre $[-20$ et $30]$. Il est donc asymétrique, avec une majorité des points regroupés sur l'axe $y=0$. Ce modèle n'est pas donc apte à prédire dans un intervalle de confiance. Les résidus du modèle général (2) sont asymétriques compris entre $[-2$ et $1]$ et chargé vers 1. Par conséquent, ce modèle n'est pas apte à prédire dans un intervalle de confiance. Les résidus du modèle général (3) sont symétriques $[-1$ et $1]$, et aléatoirement distribués autour de l'axe de régression $y=0$. Par conséquent ce modèle, est apte à prédire dans un intervalle de confiance. Par contre, le modèle général (4) a une distribution résiduelle asymétrique $[-10$ et $30]$ chargé vers -10 . Il n'est donc pas capable de prédire dans un intervalle de confiance (Figure 16, ci-après).

Figure 16: Distribution des résidus des modèles généraux d'estimation de hauteur



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

L'ensemble des modèles d'estimation des hauteurs de *Rhizophora harrisonii* ont un taux de détermination moyen de $0,81 \pm 0,05$ avec un maximum de 0,92 et un minimum 0,69. Tous les modèles testés sont donc significatifs à un taux de détermination >60 . Selon les critères r^2 ajusté,

SEE et AIC le meilleur modèle est l'équation 3 avec 0,92 de r^2 , 0,26 de SEE et 16 d'AIC (Tableau 5, ci-après).

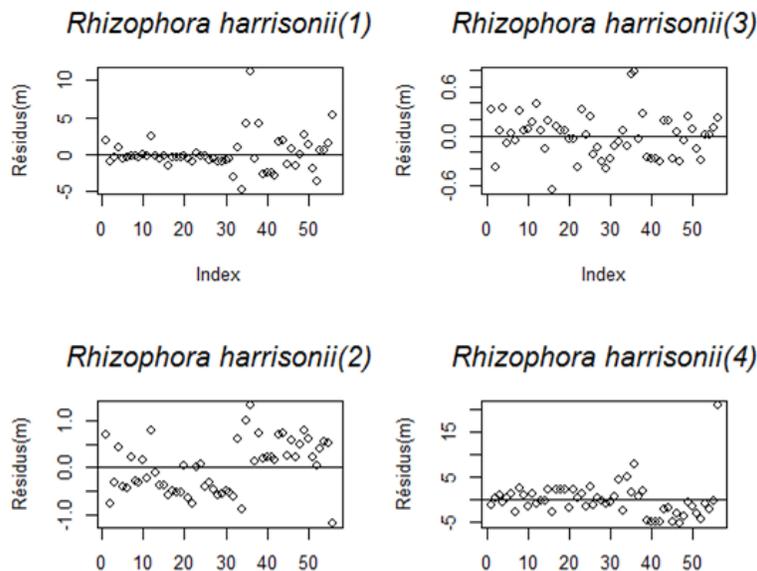
Tableau 5 : Paramètres d'appréciation du modèle de prédiction des hauteurs de *Rhizophora harrisonii*

<i>Rhizophora harrisonii</i>	n	α	b_1	R^2	R^2_{adj}	SEE	p-value	AIC
1	56	1,04	0,5	0,90	0,90	2,38	2,2e-16	260
2	56	0,73	0,06	0,70	0,69	0,55	2,2e-16	97
3	56	0,88	0,86	0,93	0,92	0,26	2,2e-16	16
4	56	-3,32	5,65	0,73	0,72	3,96	2,2e-16	317

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Le modèle *Rhizophora harrisonii* (1) a des résidus asymétriques et non aléatoires compris entre [-5 et 10]. Avec des résidus chargés vers -5, ce modèle n'est pas apte à prédire dans un intervalle de confiance. Le modèle *Rhizophora harrisonii* (2) est symétrique [-1 et 1], mais les résidus ne sont pas aléatoirement distribués. Le modèle *Rhizophora harrisonii* (3) a une distribution résiduelle symétrique et aléatoire autour l'axe de régression $y=0$. Par conséquent ce modèle est capable de prédire dans un intervalle de confiance. Le modèle *Rhizophora harrisonii* (4) est asymétrique [-5 et 20] avec une dépendance en -5. Il n'est donc pas capable de prédire dans un intervalle de confiance (Figure 17, ci-après).

Figure 17: Distribution des résidus du modèle de prédiction des hauteurs de *Rhizophora harrisonii*



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Rhizophora racemosa a un r^2 ajusté compris entre 0,69 et 0,64. Le modèle 1 et 2 ont un taux de détermination identique de 0,69 avec SEE 8,11 et 0,48, ainsi que des 24 et 26 d' AIC respectifs. Contrairement aux modèles généraux et aux modèles de *Rhizophora harrisonii*, dont les meilleurs modèles sont l'équation 3 sous la forme puissance, *Rhizophora racemosa* enregistre son meilleur modèle à l'équation 2 sous forme linéaire simple (Tableau 6, ci-après).

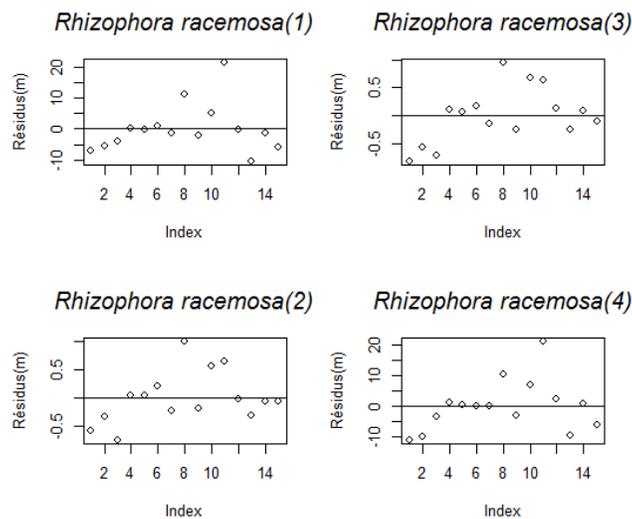
Tableau 6 : Paramètres d'appréciation du modèle de prédiction des hauteurs de *Rhizophora racemosa*

<i>Rhizophora harrisonii</i>	n	α	b_1	R^2	R^2_{adj}	SEE	p-value	AIC
1	56	1,04	0,5	0,90	0,90	2,38	2,2e-16	260
2	56	0,73	0,06	0,70	0,69	0,55	2,2e-16	97
3	56	0,88	0,86	0,93	0,92	0,26	2,2e-16	16
4	56	-3,32	5,65	0,73	0,72	3,96	2,2e-16	317

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Les résidus du modèle *Rhizophora racemosa* (1) sont asymétriques et non aléatoires [-10 et 20]. Il n'est pas capable de prédire dans un intervalle de confiance. Les modèles *Rhizophora racemosa* (2 et 3) sont symétriques [-0,5 et 0,5]. Ces deux modèles sont donc capables de prédire un intervalle de confiance. Néanmoins, le choix du meilleur modèle entre les deux réside dans le critère d'information Akaike (AIC). *Rhizophora racemosa* (3) présente une distribution résiduelle non symétrique et non aléatoire. Il n'est donc pas apte à prédire dans un intervalle de confiance (Figure 18, ci-après).

Figure 18: Distribution des résidus du modèle de prédiction des hauteurs de *Rhizophora racemosa*



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

D'une manière générale, il ressort que le DBH et la hauteur ont une relation non linéaire (Husch et al., 2003). Le modèle général et *Rhizophora harrisonii* sont calibrés en relation puissance, tandis que *Rhizophora racemosa* est calibré en relation exponentielle. En prenant en compte les critères Akaike (AIC), r^2 ajusté et de l'erreur standard estimée (SEE) les 3 modèles qui suivent ont été retenus. Plus, l'AIC est petit plus le modèle est meilleur. Donc entre les trois modèles, le meilleur modèle est celui qui a le plus petit AIC, la plus petite erreur standard estimée et le plus grand r^2 ajustée. Le modèle général renferme les espèces *Rhizophora harrisonii*, *Rhizophora racemosa*. Des trois modèles, le plus petit AIC est détenu par *Rhizophora harrisonii*, ensuite vient *Rhizophora racemosa* et, enfin, le modèle d'équation générale. Par contre en termes de r^2 ajusté, le modèle général occupe la deuxième place, et non la troisième comme précédemment. Le modèle *Rhizophora harrisonii* occupe la première place et le modèle *Rhizophora racemosa* la troisième rang. La racine carrée de la variance des résidus (RMSE) est entre 2,01 et 2,23 m pour l'ensemble des modèles. Le plus petit biais est enregistré par le modèle *Rhizophora harrisonii*, ensuite, viennent respectivement les modèles *Rhizophora racemosa* et le modèle général. Le pourcentage en biais indique une surestimation respective des modèles *Rhizophora harrisonii* et général de l'ordre de -0,24% et -0,09%. Le modèle *Rhizophora racemosa* est sous-estimateur de l'ordre de 0,01% (Tableau 7, ci-après).

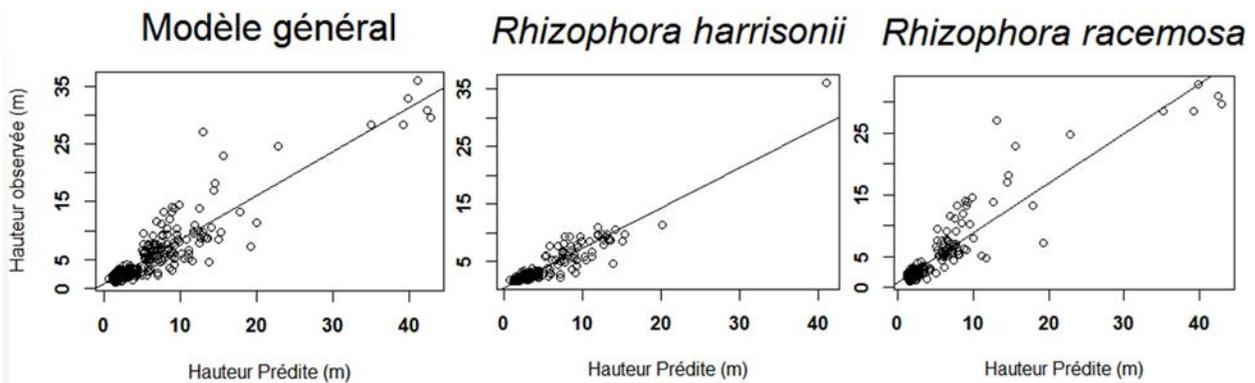
Tableau 7: Paramètres d'appréciation du modèle de prédiction des hauteurs pour l'ensemble des modèles

	Générale	<i>Rhizophora harrisonii</i>	<i>Rhizophora racemosa</i>
Équations	$H=3,67D^{0,68}$	$H=4,48D^{0,86}$	$H=4,9e^{0,03D}$
AIC	168	16	24
R²ajusté	0,79	0,92	0,69
SEE	0,42	0,26	0,48
RMSE	2,13	2,01	2,23
BIAIS	-0,41	-1,01	0,05
BIAIS (%)	-0,09	-0,24	0,01

Réalisation: Igor Akendengué Aken, 2020.

Le croisement des variables observées et des variables prédites traduisent une rareté des grands individus chez les *Rhizophora harrisonii*, par rapport aux *Rhizophora racemosa*. En effet, un seul *Rhizophora harrisonii* a un DBH supérieur à 15 m de hauteur, contre dix (10) individus de plus de 15 m de hauteur chez les *Rhizophora racemosa* (Figure 19, ci-après). Cela amène à avoir un regard particulier sur le faciès des espèces ayant les grandes hauteurs dans les cartes de canopées.

Figure 19 : Croisement des hauteurs observées et des hauteurs prédites



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Rhizophora racemosa est plus grand en hauteur que *Rhizophora harrisonii*, dont la majorité d'individus oscille entre 1 et 15 m de hauteur.

2. Densité du bois et classe de diamètre

2.1. Détermination des masses et densités

▪ Masse

Une variation de la masse humide s'observe au tronc et aux racines. L'essentiel de la masse humide du tronc oscille de 0,38 à 3,62 g, et a des points atypiques jusqu'à 15,19 g. La masse sèche du tronc varie de 0,03 à 2,12 g, et avec 7,98 g de valeur atypique. Les racines ont une masse humide de 0,35 g minimale, 7,94 g maximale et 27,78 g de valeur atypique. Il existe aussi une variabilité de la masse humide et de la masse sèche dans l'écorce et le bois, au niveau du tronc et des racines. Ainsi, les masses minimales et maximales de l'écorce sont respectivement passés de 0,38 à 0,19 g et 1,59 à 1,55 g après le séchage. Les masses minimales et maximales du bois, au niveau du tronc, qui sont passées respectivement de 0,79 à 0,03 g et de 4,15 à 2,67 g.

- Densité

Avicennia germinans a une densité générale (mixte) de 0,877 g/cm³, 0,759 g/cm³ pour l'écorce et 0,994 g/cm³ pour le bois. *Rhizophora spp* a, au niveau du tronc, 1,179 g/cm³ de densité générale, 1,583 g/cm³ pour l'écorce et 0,773 g/cm³ pour le bois (Tableau 8, ci-dessous).

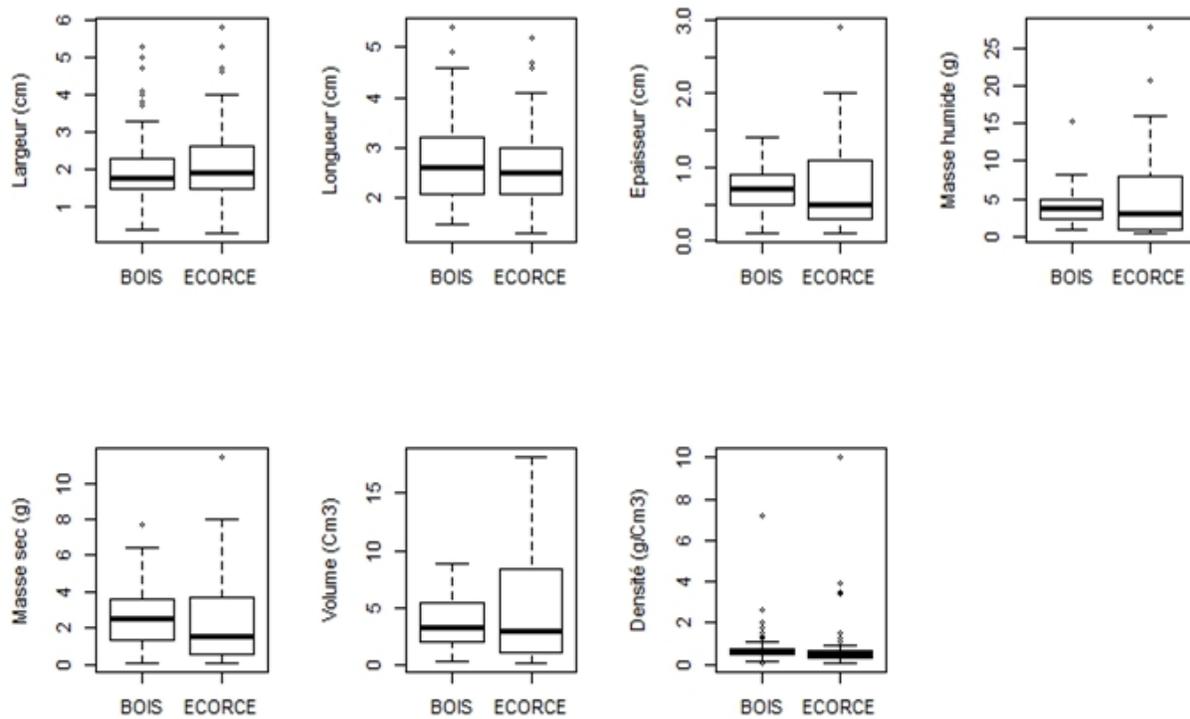
Tableau 8 : Résumé statistique descriptive des données de l'infradensité des genres *Avicennia*, *Rhizophora* et mixte

Paramètres	<i>Avicennia</i>					<i>Rhizophora</i>					mixte				
	DBH (cm)	Hauteurs (m)	densité d'écorce (g/cm ³)	densité du bois (g/cm ³)	densité mixte (g/cm ³)	DBH (cm)	Hauteurs (m)	densité d'écorce (g/cm ³)	densité du bois (g/cm ³)	densité mixte (g/cm ³)	DBH (cm)	Hauteurs (m)	densité d'écorce (g/cm ³)	densité du bois (g/cm ³)	densité mixte (g/cm ³)
Effectifs	58	58	18	18	36	98	98	14	14	28	156	156	32	32	64
Minimum	2	0.9	0.06	0.04	0.04	1.4	1.1	0.08	0.08	0.07	1.4	0.9	0.06	0.04	0.04
Maximum	127	24	3.53	7.23	7.23	75.8	53	1.76	10.3	10.3	127	53	10.03	7.23	10.03
Moyenne	29.79	11.3	0.759	0.994	0.876	12.92	9.22	0.78	1.58	1.17	19.19	10	1.12	0.9	1
Ecart-type	25.07	5.75	0.79	0.38	0.95	17.03	8.62	0.45	2.71	1.95	22	7.73	1.7	1.23	1.59
Erreur standard	3.29	0.75	0.19	1.61	1.25	1.72	0.87	0.12	0.72	0.36	1.8	0.62	0.33	0.21	0.2

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Les racines ont une densité générale de 0,695 g/cm³, 0,479 g/cm³ pour l'écorce et 0,911 g/cm³ pour le bois. D'après le test de *Fisher*, la probabilité critique (p-value) est 0,016, bien inférieure à 0.05. La variance de la densité est donc significativement différente entre *Avicennia germinans* et *Rhizophora spp*. L'intervalle de confiance, à un seuil *alpha* de 95%, est de [0,20 ; 0,84] et le quotient des variances est de 0,41 (Figure 20, ci-après).

Figure 20: Distribution graphique des paramètres de statistique descriptive des aliquotes



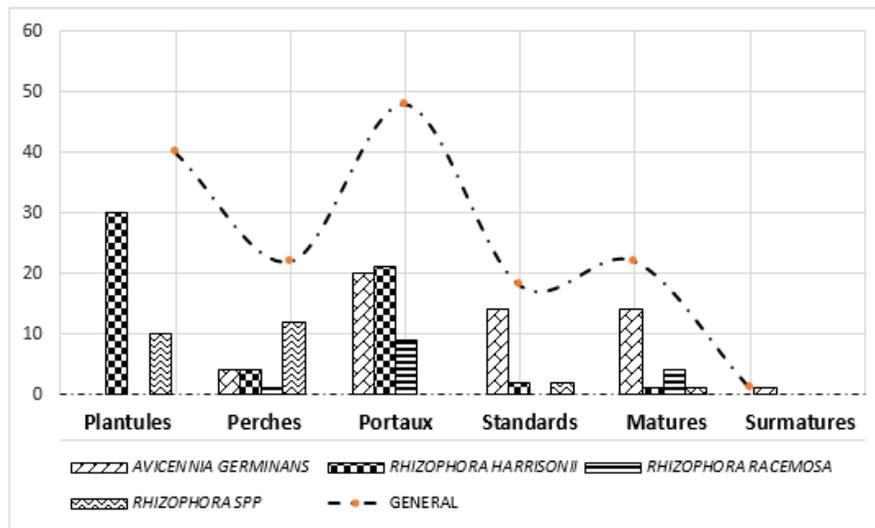
Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Le test de *Student* a une probabilité critique (p-value) de 0.48, donc supérieure à 0,05. Les moyennes de densité entre *Avicennia germinans* (0,88 g/cm³) et *Rhizophora spp* (1,18 g/cm³) sont donc identiques à 95%, dans l'intervalle de confiance de [-1,16 0,6].

2.2. Classe de diamètre

Il ressort que le DBH présente des fluctuations selon la nature de la classe: des plantules, des perches, des portaux, des standards, des matures et des surmaturées. Selon la classe l'écart-type varie de manière significative entre deux classes successives ; mais dans la tendance générale une baisse s'observe avec l'évolution des classes (Histogramme 4, ci-après).

Histogramme 4 : Classification du DBH de mangroves d'estuaires du Gabon selon la classification d'Ajonina et al. (2008)



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Ainsi par exemple, l'écart-type enregistré par la classe plantules est 17,37 cm, celle de perches 8,53 cm, et pour la classe des portaux 18,06 cm. Celle des classes standards, matures et surmaturées sont respectivement de 8,19 cm ; 9,28 cm et 0,54 cm. Dans le même ordre d'énumération, les moyennes sont de : $16 \pm 7,79$ cm pour les plantules, $8,6 \pm 3,81$ cm pour les perches, $19,6 \pm 8,07$ cm pour les portaux et, respectivement, de $7,2 \pm 3,66$ cm chez les standards, $8,4 \pm 4,15$ cm pour les matures et $0,4 \pm 0,24$ cm pour les surmaturées. De plus, le coefficient de Kurtosis est compris entre -3,33 et 1,51 pour l'ensemble des classes, avec la seule classe de surmaturées est supérieur à -3. Aussi ; le coefficient de Skewness est compris entre 0,6 et 1,21 avec les classes plantules, standards, matures et surmaturées comprises entre 0 et 0,99. La tendance générale des deux indices est que leurs moyennes totales pour l'ensemble des classes sont respectivement de -1,07 pour Kurtosis et 0,85 pour Skewness. Donc, l'ensemble des sites obéit à une structure asymétrique à droite et platykurtique à longue queue.

Il y a de ce fait une dominance d'individus dans les classes de petit DBH. L'ensemble des sites, ayant servi dans la réalisation des modèles de volume, sont donc caractérisés par une forte régénération. Cela peut être lié aux conditions écologiques favorables, ou à la particularité des espèces présentes sur les sites. Cela milite pour une situation de non-normalité de la distribution

du DBH. Du point de vue biogéographique, cela veut dire que le choix d'un échantillonnage aléatoire dans les mangroves des estuaires du Gabon révélerait des DBH qui ne sont pas pris en compte par la présente classification élaborée par Ajonina (2008) pour la mangrove du Cameroun. Donc, selon les analyses, les modèles élaborés avec la présente distribution de DBH peuvent encore connaître une évolution avec la découverte des individus de plus petits ou de plus grands DBH.

3. Modèle allométrique de volume

3.1. Modèles de volume calibré

Les paramètres des 50 modèles sont représentés dans les tableaux 9 à 13, ci-après. Les modèles sont regroupés en pair de 10 modèles par espèce. Dans les modèles généraux, nous enregistrons un r^2 ajusté de 0,38 au modèle 10. Dans cette catégorie, les 9 autres modèles ont des r^2 ajustés compris entre 0,70 et 1 de détermination (Tableau 8, ci-après).

Tableau 9 : Paramètres d'appréciation du modèle général de prédiction de volume

Equation générale	n	α	b_1	b_2	b_3	R^2	R^2_{adj}	SEE	p-value	AIC
1	151	-0.73	0.074			0.732	0.73	1.06	< 2.2e-16	451
2	151	0.32	0.004	-0.12	0.004	0.9525	0.952	0.4515	< 2.2e-16	194
3	151	0.32	0.004	-0.12	0.004	0.9525	0.952	0.4515	< 2.2e-16	194
4	151	0.32	0.004	-0.12	0.004	0.9525	0.952	0.4515	< 2.2e-16	194
5	151	0.32	0.004	-0.12	0.004	0.9525	0.952	0.4515	< 2.2e-16	194
6	151	-0.73	0.074			0.732	0.73	1.065	< 2.2e-16	451
7	151	-5.57	0.115			0.7127	0.71	1.735	< 2.2e-16	599
8	151	6E-05	2.68			0.9835	0.983	0.42	< 2.2e-16	168
9	151	-9.69	2	1		1	1	3.91E-07	< 2.2e-16	-4022
10	151	-1.73	1.06			0.3844	0.38	1.614	< 2.2e-16	577

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Les modèles de *Rhizophora harrisonii* ont un r^2 ajusté situé entre 0,64 et 1 de détermination avec une moyenne de $0,83 \pm 0,6$. Ils ont également des erreurs standard d'estimation compris entre $6,25 \times 10^{-7}$ et $0,815 \text{ m}^3$ (Tableau 10, ci-après).

Tableau 10 : Paramètres d'appréciation du modèle de prédiction de volume *R. harrisonii*

<i>Rhizophora harrisonii</i>	n	α	b_1	b_2	b_3	R ²	R ² adj	SEE	p-value	AIC
1	56	-0.54	0.07761			0.6466	0.64	0.8157	8.44E-14	140
2	56	0.13	-2.72E-02	-3.26E-02	4.27E-03	0.996	0.996	0.8157	< 2.2e-16	-107
3	56	0.13	-2.72E-02	-3.26E-02	4.27E-03	0.996	0.996	0.8157	< 2.2e-16	-107
4	56	0.13	-2.72E-02	-3.26E-02	4.27E-03	0.996	0.996	0.8157	< 2.2e-16	-107
5	56	0.13	-2.72E-02	-3.26E-02	4.27E-03	0.996	0.996	0.8157	< 2.2e-16	-107
6	56	-0.54	0.07761			0.6466	0.64	0.8157	8.44E-14	140
7	56	-7.23	0.2			0.7554	0.751	1.636	< 2.2e-16	218
8	56	4E-05	2.85862			0.9934	0.993	0.2695	< 2.2e-16	16
9	56		2.85			0.9934	0.993	0.2695	< 2.2e-16	16
10	56	3.852	2	1		0.2386	0.225	1.20E+00	0.000134	183

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Rhizophora racemosa a une moyenne de r² ajusté de $0,87 \pm 0,27$ de détermination. Le critère d'information d'Akaike (AIC) est compris entre 8 et -1436 avec 4 modèles d'AIC = 8 (Tableau 11, ci-après).

Tableau 11 : Paramètres d'appréciation du modèle de prédiction de volume *R. racemosa*

<i>Rhizophora racemosa</i>	n	α	b_1	b_2	b_3	R ²	R ² adj	SEE	p-value	AIC
1	15	-1.61	0.12865			0.8854	0.877	1.226	1.76E-07	53
2	15	0.137	0.0017	-0.0641	0.0039	0.996	0.994	0.7286	2.72E-09	37.72
3	15	0.137	0.0017	-0.0641	0.0039	0.9954	0.994	0.2665	3.85E-13	8
4	15	0.137	0.0017	-0.0641	0.0039	0.9954	0.994	0.26	3.85E-13	8
5	15	0.137	0.0017	-0.0641	0.0039	0.9954	0.994	0.26	3.85E-13	8
6	15	-1.614	0.12865			0.88	0.87	1.226	1.76E-07	140
7	15	-4.13	0.09			0.9603	0.957	0.5	1.72E-10	25
8	15	4E-05	2.8567			0.957	0.954	0.5181	2.89E-10	27
9	15	3.852	2	1		1	1	1.28E-09	< 2.2e-16	-1436
10	15	-0.699	0.5811			0.23	0.22	1.197	0.000133	59

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Pour *Rhizophora spp* , l'amplitude de détermination est 0,78 avec un maximum de 1 et minimum 0,22. Les valeurs de l'AIC des modèles de cette espèce sont entre -1436 et 75. Ceci

équivalent à une amplitude -1361, contre une moyenne de -140.6 ± 144.50 et une médiane de 12 (Tableau 12, ci-après).

Tableau 12 : Paramètres d'appréciation du modèle de prédiction de volume (*R. racemosa*)

<i>Rhizophora spp</i>	n	α	b_1	b_2	b_3	R ²	R ² adj	SEE	p-value	AIC
1	25	-0.29	0.05			0.9015	0.897	0.2877	4.60E-13	13
2	25	0.379	-0.076	-0.043	0.008	0.9891	0.988	0.1003	< 2.2e-16	-38
3	25	0.379	-0.076	-0.043	0.008	0.9891	0.988	0.1003	< 2.2e-16	-38
4	25	0.379	-0.076	-0.043	0.008	0.9891	0.988	0.1003	< 2.2e-16	-38
5	25	0.379	-0.076	-0.043	0.008	0.9891	0.988	0.1003	< 2.2e-16	-38
6	25	-0.29	0.05			0.9015	0.897	0.2877	4.60E-13	13
7	25	-5.74	0.114			0.7932	0.784	1	2.47E-09	75
8	25	1E-04	2.52			0.9579	0.956	0.45	< 2.2e-16	36
9	25	3.852	2	1		1	1	8.94E-08	< 2.2e-16	-1436
10	25	-0.69	0.58			0.24	0.22	1.197	0.000134	45

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020

Le r² ajusté d'*Avicennia germinans* est $0,84 \pm 0,05$ avec une amplitude de 0,56. La moyenne des erreurs d'estimation est de $0,74 \pm 0,14$. La moyenne de l'AIC est de $-91,4 \pm 221,27$, avec un minimum de 10 et maximum de 217 (Tableau 13, ci-après).

Tableau 13 : Paramètres d'appréciation du modèle général de prédiction de volume (*A. germinans*)

<i>Avicennia germinans</i>	n	α	b_1	b_2	b_3	R ²	R ² adj	SEE	p-value	AIC
1	55	-1.38	0.07			0.8049	0.801	0.9909	< 2.2e-16	159
2	55	1.22	-0.027	-0.21	0.007	0.9324	0.928	0.5947	< 2.2e-16	105
3	55	1.22	-0.027	-0.21	0.007	0.9324	0.928	0.5947	< 2.2e-16	105
4	55	1.22	-0.027	-0.21	0.007	0.9324	0.928	0.5947	< 2.2e-16	105
5	55	1.22	-0.027	-0.21	0.007	0.9324	0.928	0.5947	< 2.2e-16	105
6	55	-1.38	0.07			0.8049	0.801	0.9909	< 2.2e-16	159
7	55	-3.32	0.067			0.72	0.71	1.087	< 2.2e-16	169
8	55	7E-05	2.37			0.9731	0.973	0.3386	< 2.2e-16	41
9	55	3.852	2	1		1	1	1.44E-09	< 2.2e-16	-2078
10	55	-4.29	1.73			0.4413	0.431	1.677	3.21E-08	217

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

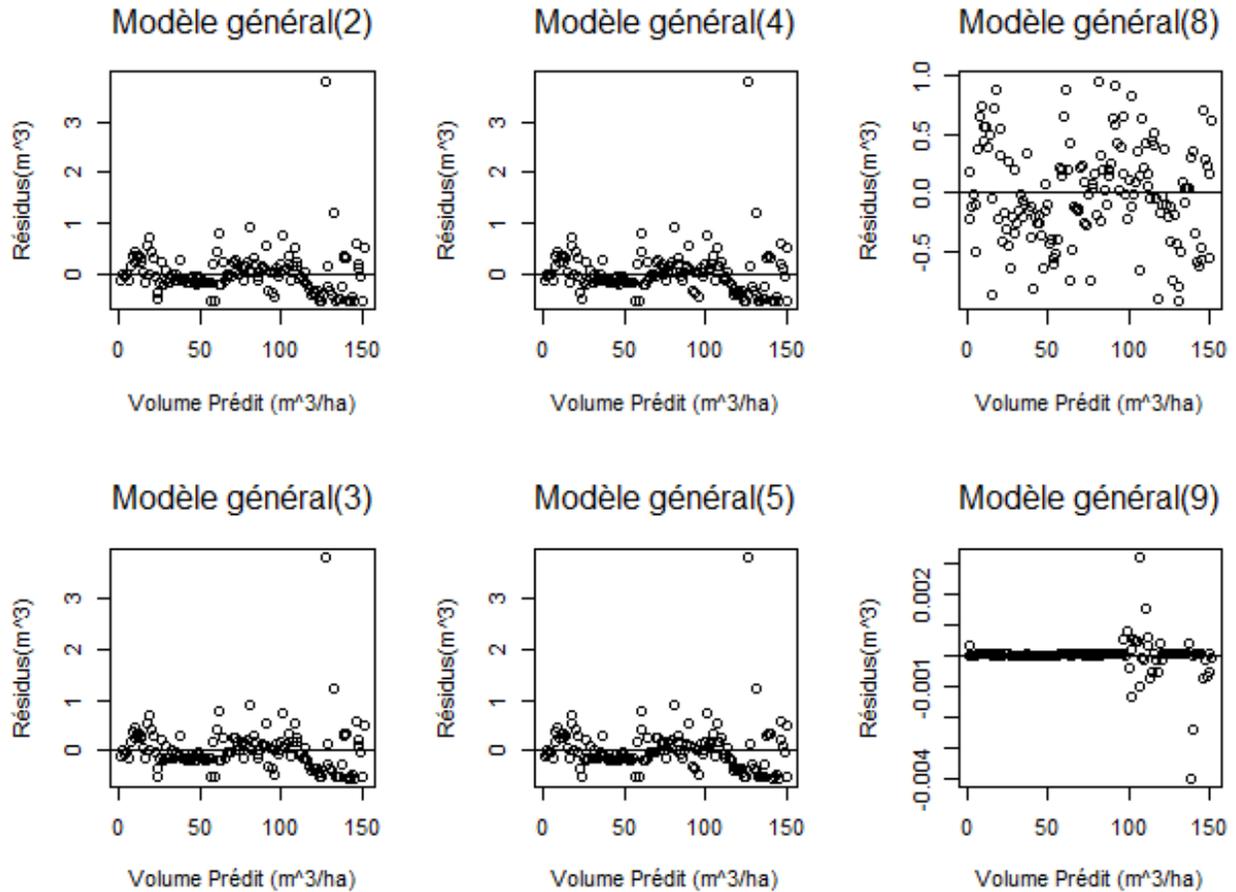
La tendance générale est le fait d'avoir, dans chaque catégorie d'espèce, un modèle ayant un taux de détermination de 100%. En se basant sur le critère de taux de détermination, le modèle 10 est éliminé de la catégorie des modèles pour l'ensemble des espèces *Rhizophora racemosa*, *Rhizophora racemosa* et *Avicennia germinans*, car ils ont un taux de détermination inférieur à 50%. Donc, ils sont moins précis dans leur estimation de volume. Les 47 modèles restant sont ceux qui satisfont le critère de taux de détermination supérieur à 50%. En prenant en compte le critère de l'erreur standard des estimations (SEE), 8 autres modèles sont retirés. Il s'agit des modèles suivants : 1 dans les modèles généraux, 1,6 et 10 chez *Rhizophora harrisonii*, et 7 et 10 chez *Avicennia germinans* et *Rhizophora spp*, qui ont SEE supérieur à 0. Cela leurs procurent automatiquement une AIC élevé.

Selon le critère d'AIC de r^2 ajusté identique ou proche, est considéré comme meilleur modèle celui qui a le petit plus petit AIC. Donc, à ce stade de l'analyse, plusieurs autres peuvent être retirés malgré le fait qu'ils remplissent le critère de r^2 ajusté supérieur à 50 et celui de SEE proche de 0. À cet instant, nous appliquons le critère de variance, car un modèle peut avoir un r^2 ajusté de 0.99, un SEE inférieur à 0 et un AIC le plus qui soit et ne pas avoir une variance constante dans la prédiction (Aighe et al., 2013 ; Akindele et LeMay, 2006).

Dans les figures 21 à 29, nous avons la distribution des 50 modèles testés pour prédire le volume. Deux critères interviennent dans le choix des modèles, par rapport à la distribution des résidus. Il y'a la symétrie des résidus par rapport à l'axe $y=0$, et la distribution aléatoire des résidus. Dans les modèles généraux (1, 2, 3 et 4), les résidus sont respectivement entre [-2 et 4] pour le premier modèle et [0 et 3] pour les trois autres.

Le modèle général (5) a également des résidus asymétriques compris entre [0 et 3] avec une forte dépendance en 0, donc chargé vers le bas. Par contre, dans le modèle général 6, les résidus sont entre [-2 et 4] chargé vers -2. Tandis que le modèle général (7) est chargé en 2 dans un intervalle de [-6 à 2]. Compris entre [-0.5 et 0.5], le modèle général (8) présente une situation symétrique des résidus aléatoirement distribués par rapport à l'axe $y = 0$. Ce modèle remplit les conditions de prédiction dans un intervalle de confiance (Figure 21, ci-après).

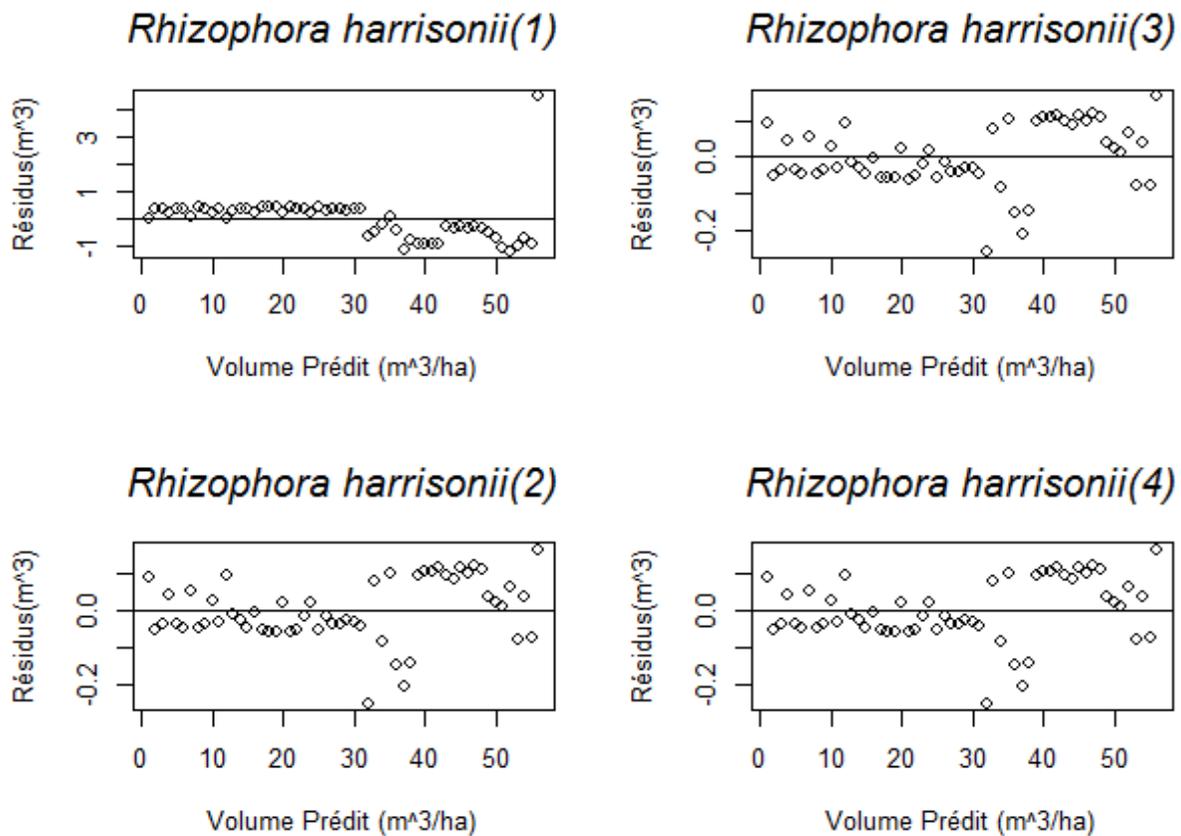
Figure 21: Distribution des résidus du modèle général de prédiction de volume



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Les modèles généraux 9 et 10, ainsi que les modèles *Rhizophora harrisonii* 1 et 2, sont favorables à une asymétrie résiduelle ; tantôt chargé vers le bas, et tantôt ouvert vers la droite pour le modèle *Rhizophora harrisonii* 2. Il en est de même pour les modèles *Rhizophora harrisonii* 3, 4 et 5 qui ont des résidus chargés vers la valeur 0 et 1(Figure 22, ci-après).

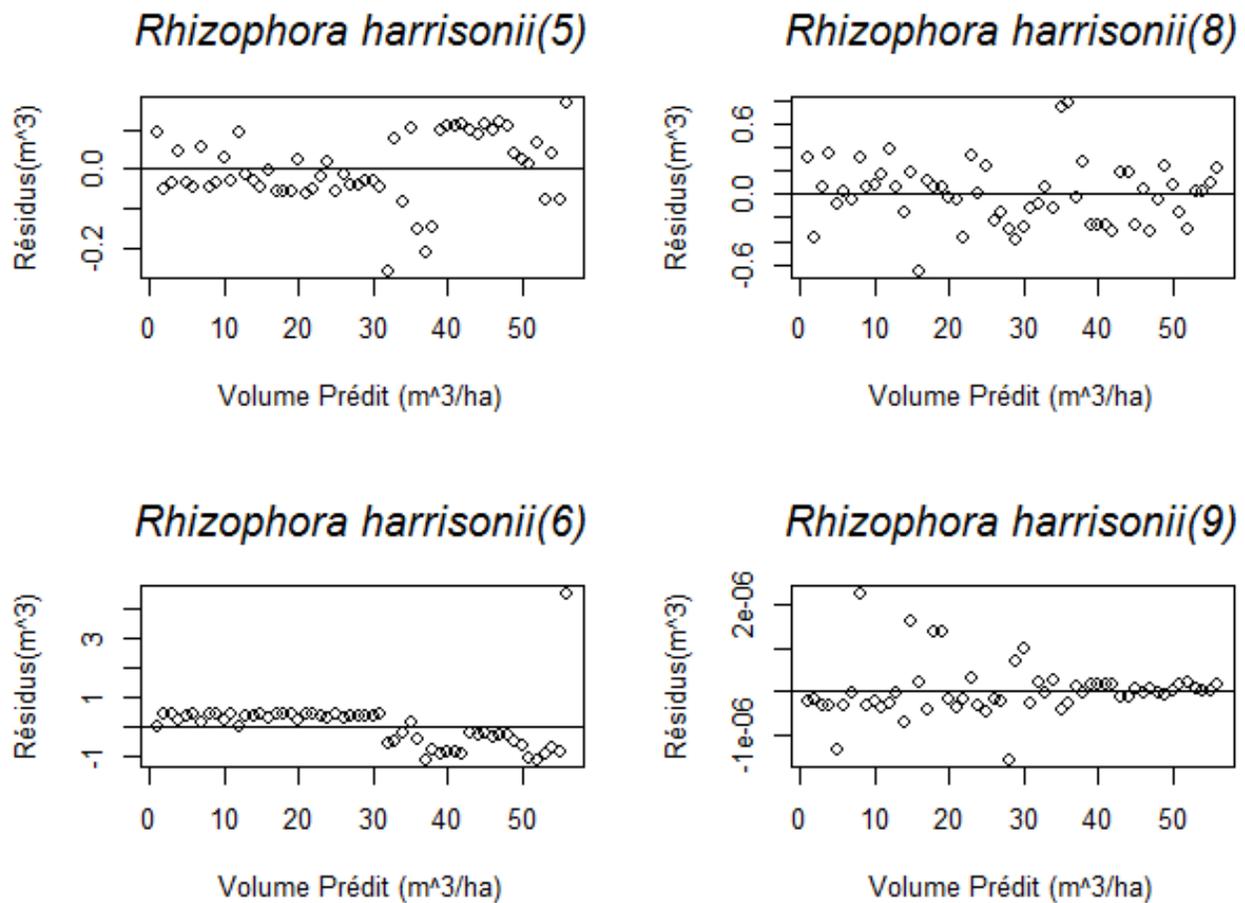
Figure 22: Distribution des résidus des modèles (1-4) de prédiction de volume de *Rhizophora harrisonii*



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Les modèles *Rhizophora harrisonii* 5 et 6, quant à eux, ont des résidus symétriques ; mais, ils traduisent une dépendance dans la distribution des résidus. Contrairement au modèle *Rhizophora harrisonii* 7, qui est en situation d'asymétrie entre [-4 et 2], le modèle 8 de cette même espèce a une distribution symétrique et aléatoire autour de l'axe $y = 0$. Ce modèle a donc une prédiction de volume de mangrove homogène. Le modèle *Rhizophora harrisonii* 9 a une distribution en queue de comète vers la gauche. Tandis que le modèle *Rhizophora harrisonii* 10 est asymétrique chargé vers le bas dans un intervalle [0 et 6] (Figure 23, ci-après).

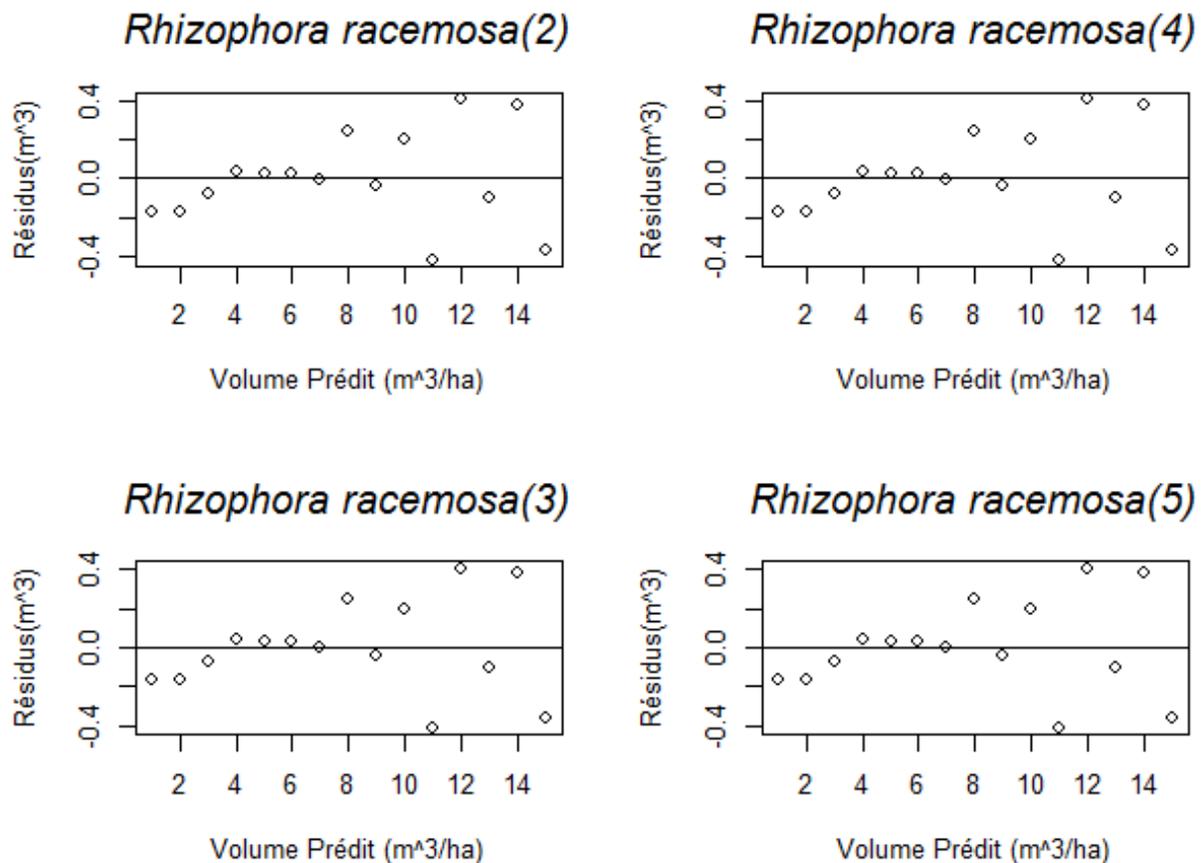
Figure 23: Distribution des résidus des modèles (5-9) de prédiction de volume de *Rhizophora harrisonii*



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Les modèles *Rhizophora racemosa* de 1 à 6 présentent une distribution résiduelle en queue de comète ouverte vers la droite. Tandis que les modèles 7 et 8 de cette même espèce sont symétriques, avec des résidus aléatoirement distribués par rapport à l'axe $y = 0$. Ces modèles sont aptes à prédire dans un intervalle de confiance. Ce qui n'est pas le cas des modèles 9 et 10, qui sont asymétriques entre $[-3^{\circ}09$ et $1^{\circ}09]$ pour le premier et $[0$ et $6]$ pour le second (Figure 24, ci-après).

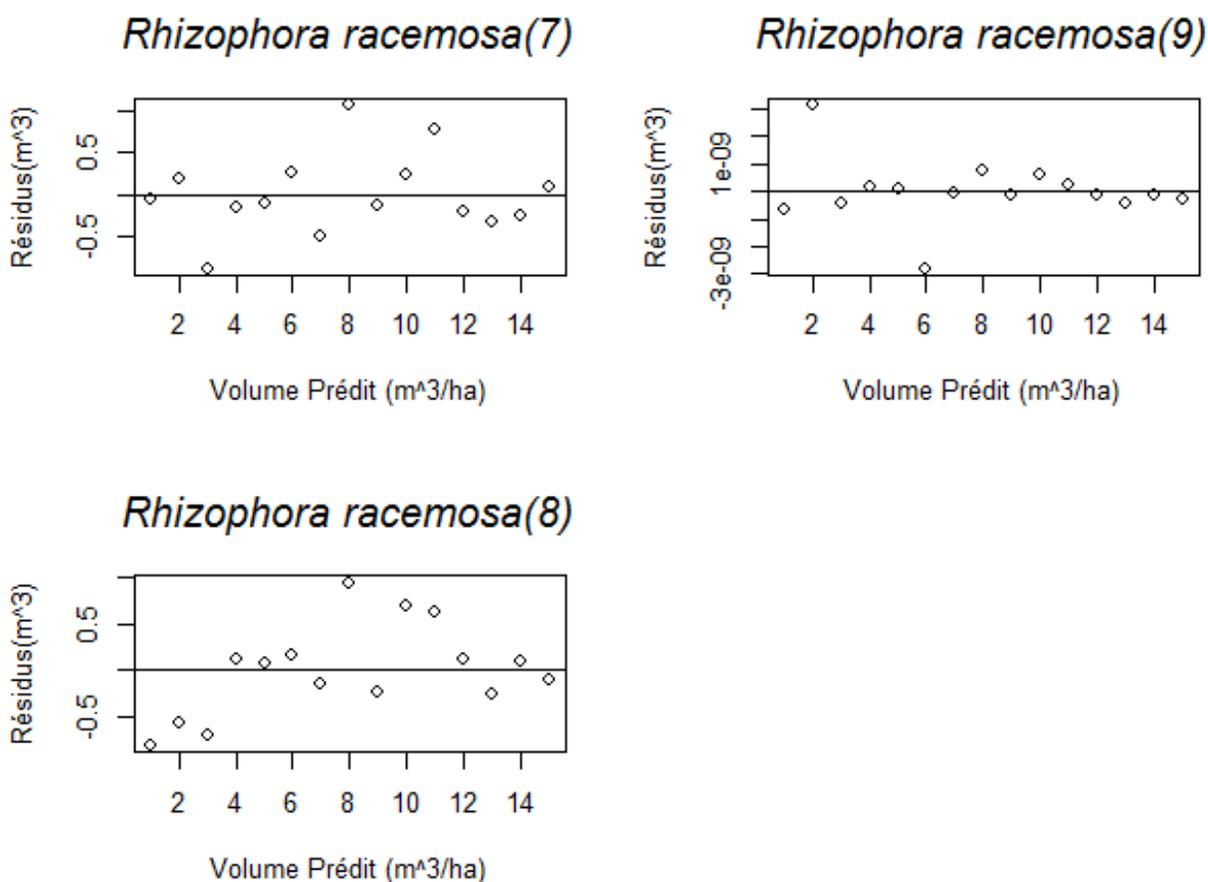
Figure 24: Distribution des résidus des modèles (2-5) de prédiction de volume de *Rhizophora racemosa*



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Les modèles *Rhizophora spp* de 1 à 7 ont des distributions tendanciées, soit en queue de comète orientée vers le bas ou le haut, soit linéaire plongeant vers le bas. Par ailleurs, le modèle *Rhizophora spp* (8) a une distribution symétrique et aléatoire comprise entre [-1 et 1]. Ce modèle est dit bon, car il peut prédire dans un intervalle de confiance. Ce qui n'est pas le cas des modèles *Rhizophora spp* 9 et 10, qui sont asymétriques, chargé vers le haut pour le premier et vers le bas pour le second (Figure 25, ci-après).

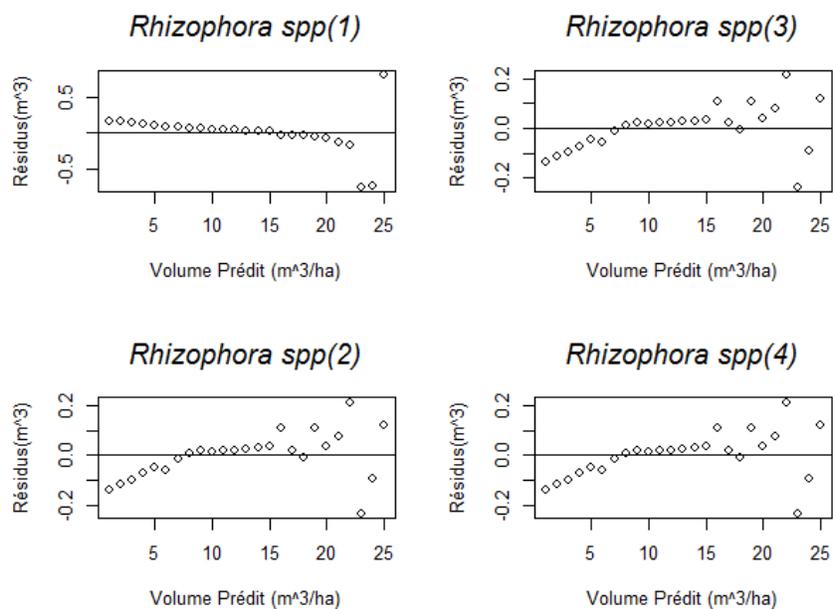
Figure 25: Distribution des résidus des modèles (7-9) de prédiction de volume de *Rhizophora racemosa*



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

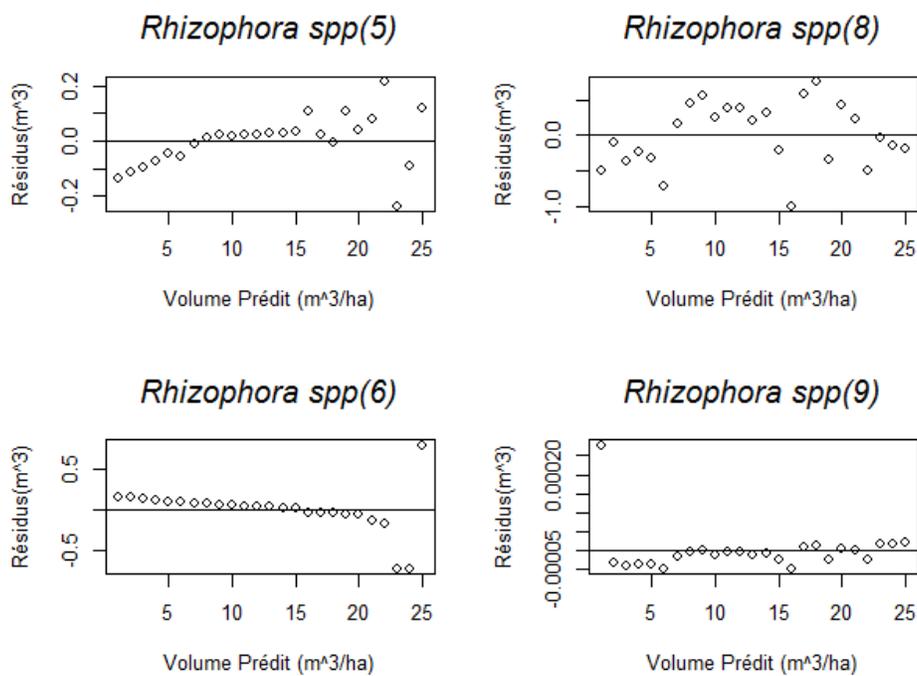
Les modèles *Avicennia germinans* de 1 à 7 sont asymétriques chargé vers le haut pour les 6 premiers formant des queues de comètes, et chargé vers le bas pour le dernier. Le modèle *Avicennia germinans* 8 est en situation de symétrie entre [-0.5 et 0.5], avec une distribution résiduelle aléatoire autour de l'axe $y = 0$. Ce modèle est donc capable de prédire dans un intervalle de confiance. Par contre, les modèles *Avicennia germinans* 9 et 10 sont asymétriques (Figures 26, ci-avant, à 29, ci-après).

Figure 26: Distribution des résidus des modèles (1-4) de prédiction de volume de *Rhizophora spp*



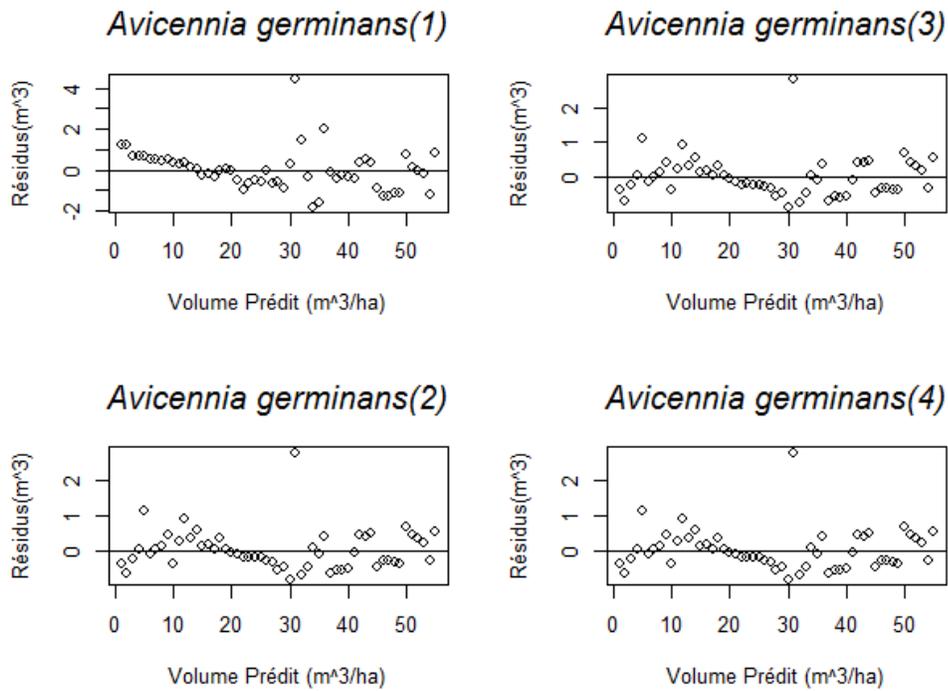
Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Figure 27: Distribution des résidus des modèles (5-6/8-9) de prédiction de volume de *Rhizophora spp*



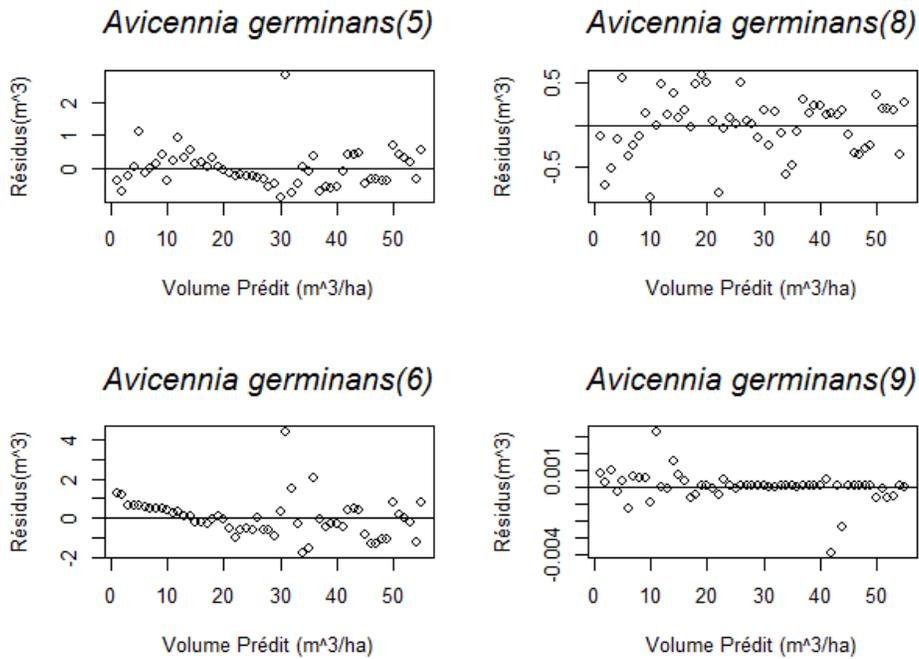
Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Figure 28: Distribution des résidus des modèles (1-4) de prédiction de volume d'*Avicennia germinans*



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Figure 29: Distribution des résidus des modèles (5-6/8-9) de prédiction de volume d'*Avicennia germinans*

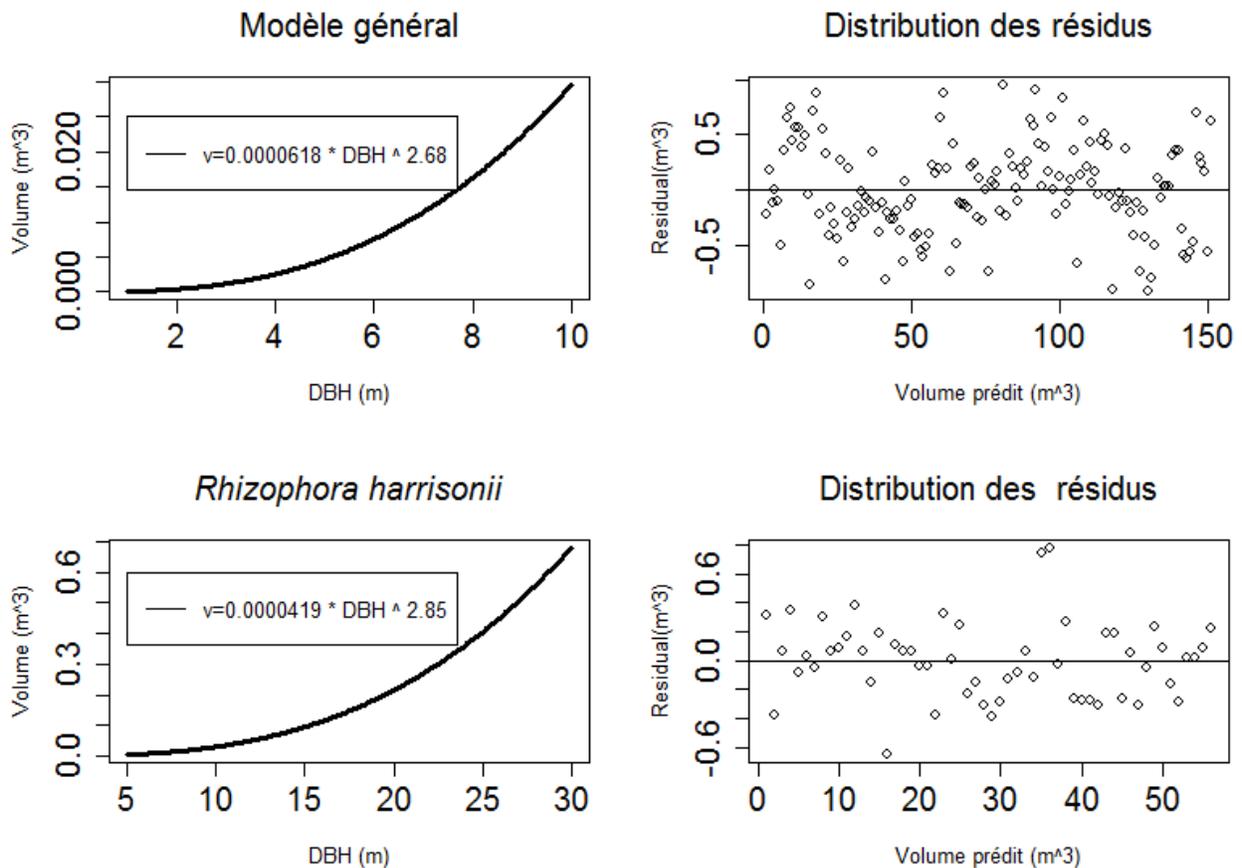


Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

3.2. Modèles validés et retenus

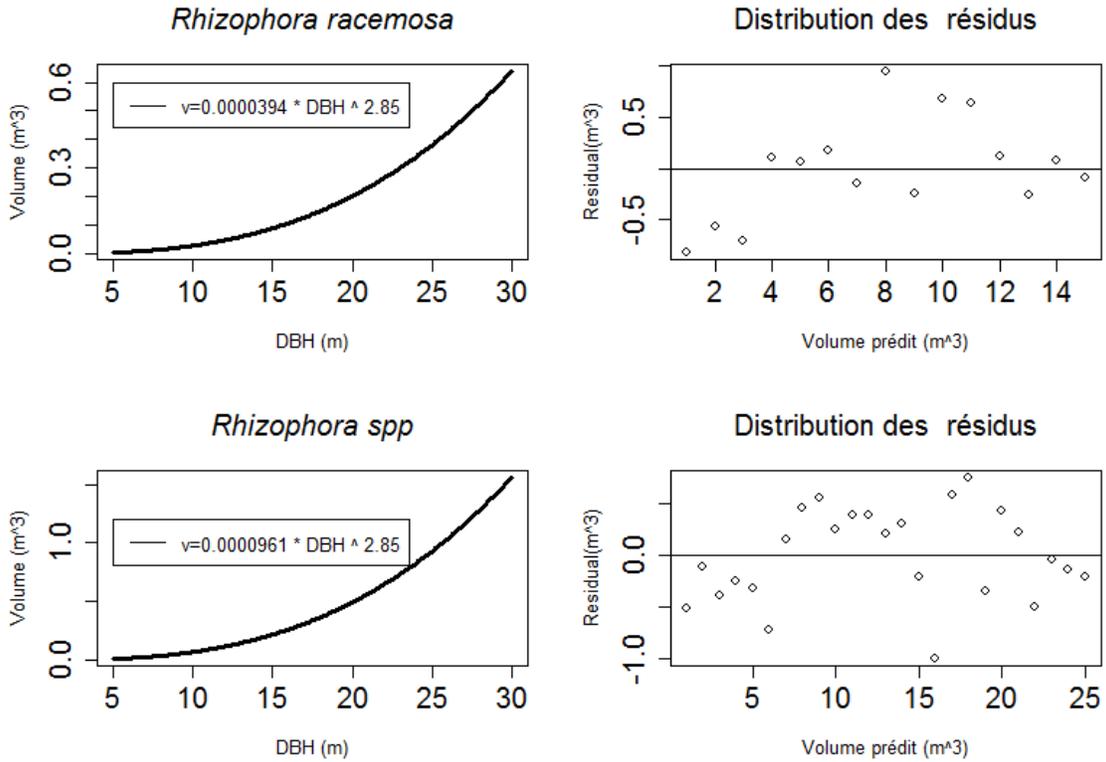
En général, un modèle est bon lorsque les résidus sont distribués de manière aléatoire et symétrique à l'axe $y = 0$. À partir de ce critère, et de celui d'AIC, R^2 et celui de RMSE, 5 modèles ont été retenus sur les 50 de départ, soit un taux de 10 % (Figures 30 à 32, ci-après). Habituellement le critère de R^2 et AIC suffisent pour discriminer les modèles allométriques. Compte tenu du grand nombre des modèles testés, certains d'entre eux avaient des AIC et R^2 identiques. Alors, il a fallu ajouter les autres critères RSE et RMSE pour les départager. Ainsi donc, deux modèles ayant un R^2 et AIC identiques, celui ayant le plus petit RMSE est le meilleur.

Figure 30: Modèles retenus pour la prédiction du volume et leurs résidus (général et *Rhizophora harrisonii*)



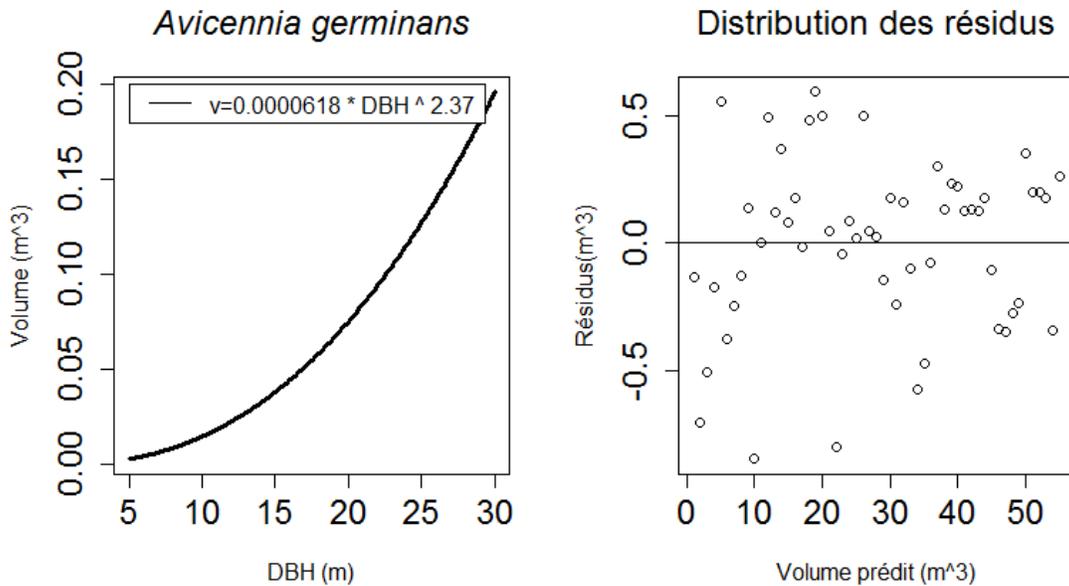
Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Figure 31: Modèles retenus pour la prédiction du volume et leurs résidus (*Rhizophora racemosa* et *Rhizophora spp*)



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Figure 32: Modèles retenus pour la prédiction du volume et leurs résidus (*Avicennia germinans*)



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Il ressort que le modèle général a rmse de 0,051 et biais -0,004 par rapport aux données observées. Cela représente 0,16% de biais. *Rhizophora harrisonii* a un rmse de 0,245 avec 0,055 de biais, soit 0,5% de biais par rapport aux données observées. *Rhizophora racemosa* a un rmse de 0,046, un biais de -0,003 pour -0,476% de biais en comparaison aux données observées. *Rhizophora spp* manifeste un rmse de 0,236 avec 0,043 de biais, soit -0,229% par rapport aux données de terrain. Enfin, le modèle *Avicennia germinans* a un rmse 0,32, un biais de 0,128 et 0,552 de biais par rapport aux observations de terrain. De manière globale, selon le critère rmse, le modèle *Rhizophora racemosa* occupe la première place avec 0,046. Ensuite, le modèle général avec 0,051 rmse est suivi par le modèle *Rhizophora spp* avec 0,236 rmse. Aussi, il y'a le modèle *Rhizophora harrisonii* avec 0,245 et *Avicennia germinans* avec 0,32. Ce classement est différent, selon le critère d'information d'Akaike. En effet, selon ce critère la première est occupée par *Rhizophora harrisonii* avec 16 AIC. Elle est suivie par *Rhizophora racemosa* (27 AIC), *Rhizophora racemosa* (35 AIC), *Avicennia germinans* (41) et par le modèle général (168). Le modèle *Rhizophora spp* a conservé son rang, malgré le changement de critère (Tableau 14, ci-après).

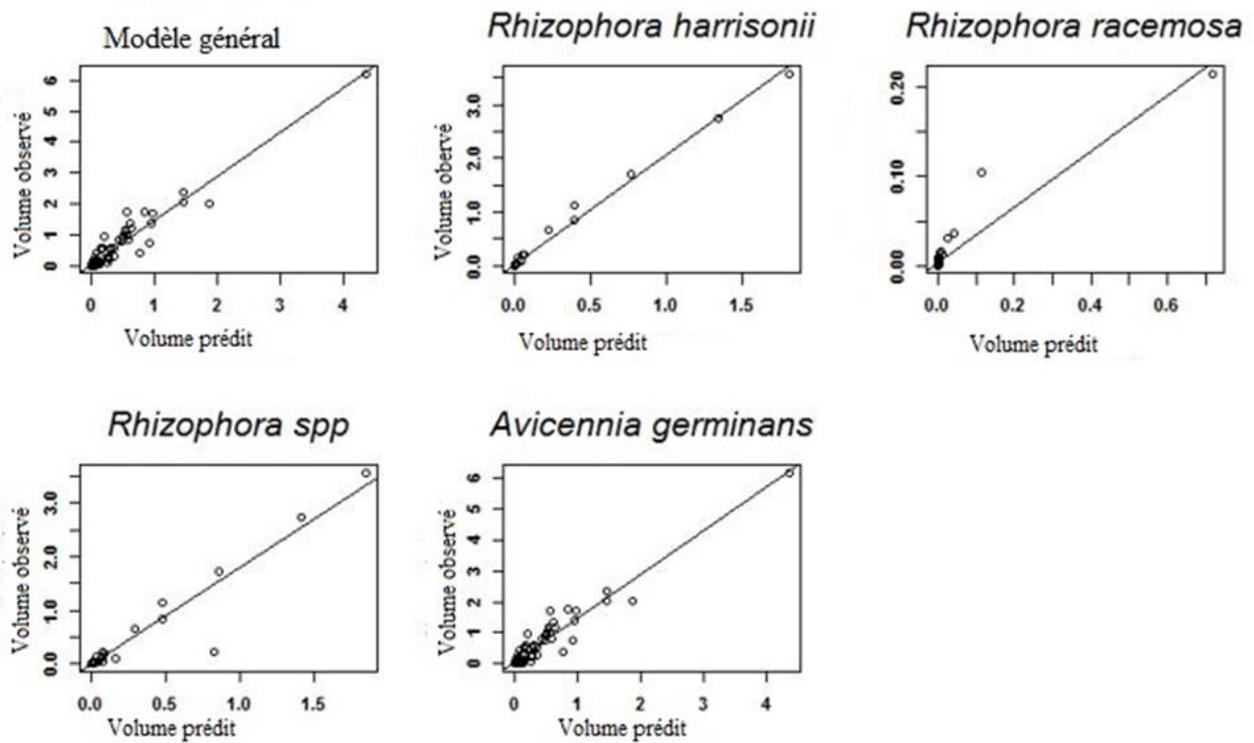
Tableau 14 : Modèles retenus pour la prédiction du volume et leurs critères d'appréciation

Espèces	n	Equations	RMSE	BIAS	BIAS%	R ²	R ² adj	AIC	SEE
Général	151	V=0.0000618D ^{2.68}	0.051	-0.004	0.163	0.98	0.98	168	0.42
<i>Rhizophora harrisonii</i>	56	V=0.0000394D ^{2.85}	0.245	0.055	0.551	0.99	0.99	16	0.26
<i>Rhizophora racemosa</i>	15	V=0.0000419D ^{2.85}	0.046	-0.003	-0.476	0.95	0.95	27	0.52
<i>Rhizophora spp</i>	25	V=0.0000961D ^{2.52}	0.236	0.043	-0.229	0.95	0.95	35	0.46
<i>Avicennia germinans</i>	55	V=0.0000682D ^{2.37}	0.32	0.128	-0.552	0.97	0.97	41	0.33

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

La dispersion des valeurs observées aux valeurs prédites suivent une ligne droite pour l'ensemble des modèles, excepté chez *Rhizophora racemosa*. Vu que ce modèle *Rhizophora racemosa* remplit toutes les conditions statistiques requises, ce léger décalage entre les valeurs observées et valeurs prédites peut être induit par un faible nombre de données test (Figure 33, ci-après).

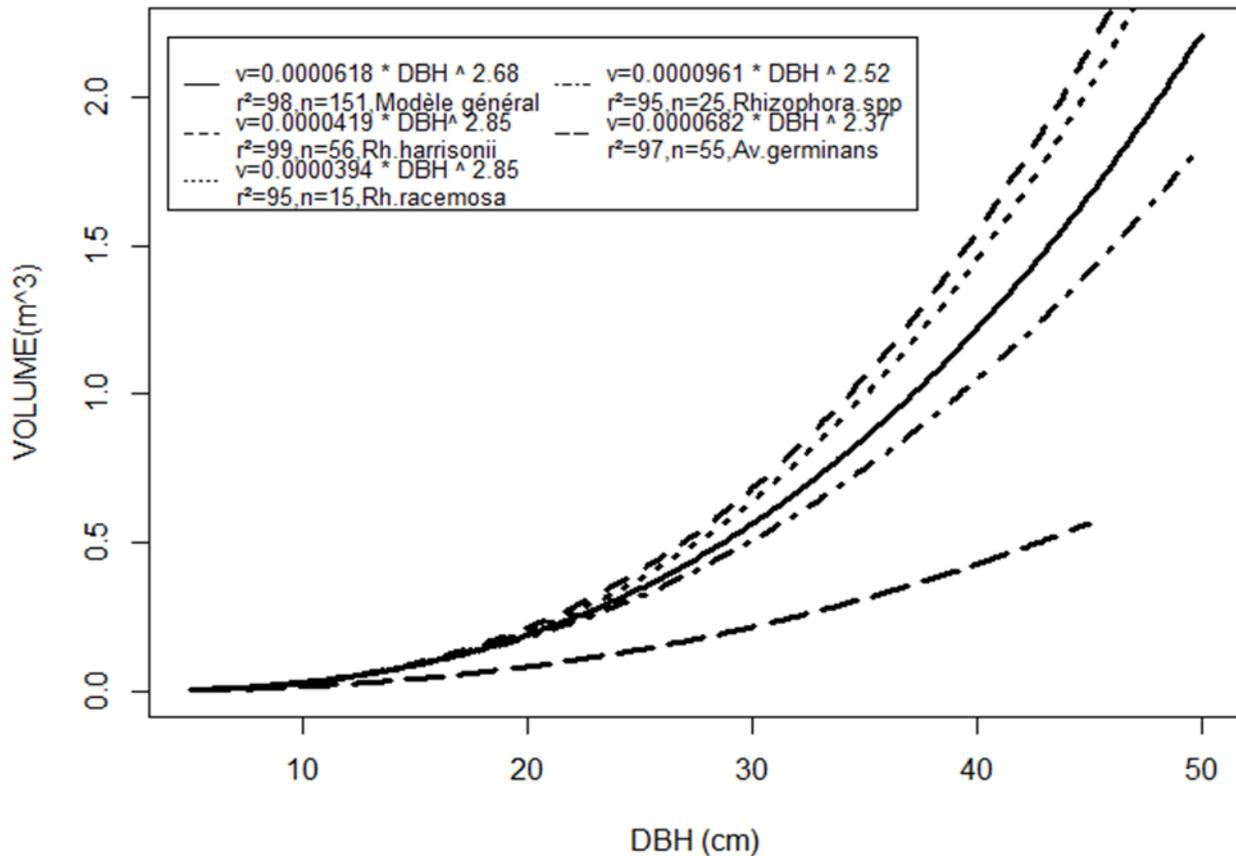
Figure 33: Croisement entre le volume observé et le volume prédit pour l'ensemble des modèles retenus



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Du haut vers le bas, les modèles se classent comme suit : le modèle général, respectivement les modèles *Rhizophora harrisonii*, *Rhizophora racemosa*, *Rhizophora spp* et *Avicennia germinans*. La superposition des différents modèles susmentionnés, dans un intervalle de DBH [5 – 50 cm], traduit ceci : dans l'intervalle [5 – 10 cm] de DBH, les 5 modèles ont des estimations qui se superposent. Au-delà de cet intervalle, la courbe du modèle d'*Avicennia germinans* se démarque. Les 4 autres modèles continuent d'être superposés jusqu'à 22 cm de DBH. Au-delà de cette borne, le modèle général en gardant le dessus et *Rhizophora spp* se détachent des deux autres. De [22 à + ∞] continuent très proche avec *Rhizophora harrisonii* au-dessus de *Rhizophora racemosa* (Figure 34, ci-après).

Figure 34: Comparaison des prédictions de l'ensemble des équations entre-elles



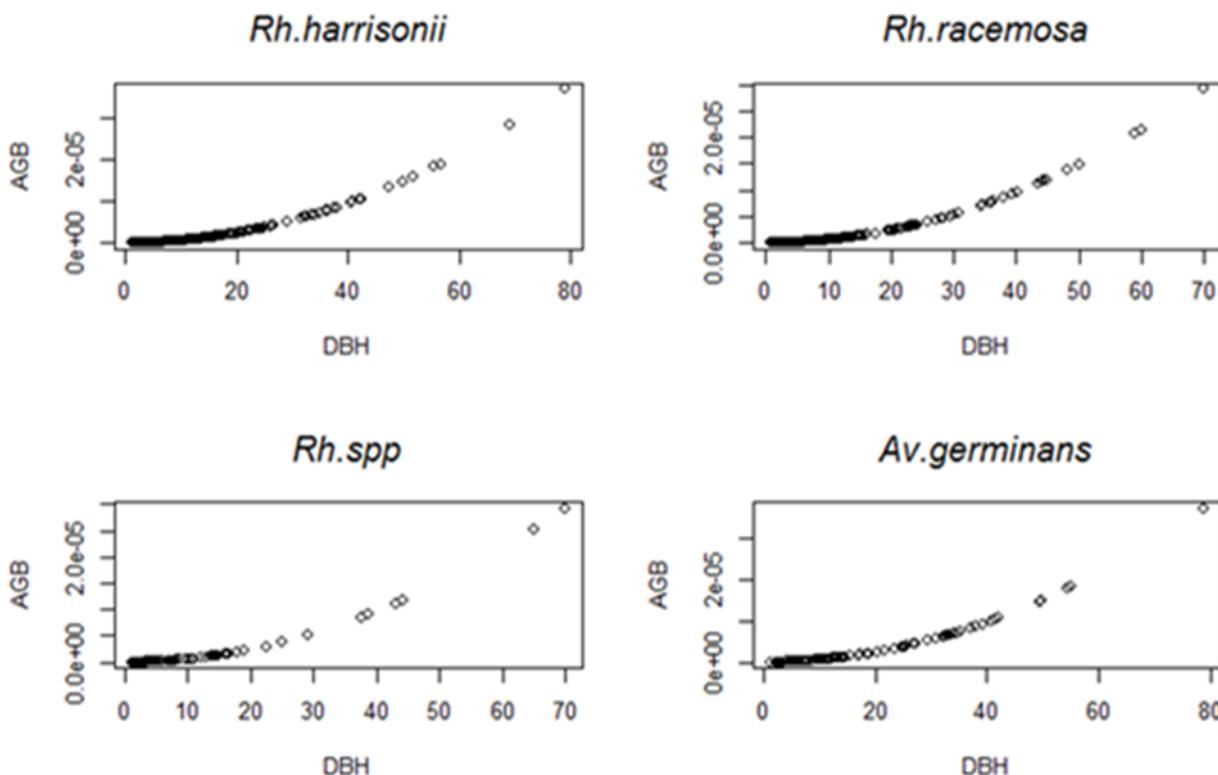
Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

4. Équations de biomasse

4.1. Estimation du modèle

L'exploration graphique des variables dépendantes et indépendantes ont transcrit une relation non linéaire de type puissance. Vu également que la détermination des équations de volume ont été déterminés définit par ce type de relation puissance, alors la biomasse qui n'est autre que la dérivée du volume est traduite par la même relation ($AGB=v*p*f$). Où v est le volume, p est la densité du bois et f le facteur forme. La relation non linéaire est fréquente en foresterie et est la plus utilisée (Cailliez 1980 ; Husch et al. 2003) ; Figure 35, ci-après.

Figure 35: Diagnostic du type de relation entre l'AGB et le DBH pour l'ensemble des espèces



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Les 5 modèles ont une moyenne d'erreur standard résiduelle de $0,39 \pm 0,04$ et un critère d'information d'Akaike (AIC) moyen $57 \pm 0,08$. Le minimum du taux de détermination ajusté est de 95% pour un maximum de 99% soit une moyenne de $96 \pm 0,008\%$. L'ensemble de modèle totalise un biais de 4,1% soit $0,8 \pm 0,05\%$ de biais moyen. L'amplitude du rmse est de 1^e-05 soit une moyenne de $6^e-07 \pm 3^e-06$. Selon le pourcentage de biais, le meilleur modèle est celui d'*avicennia germinans* avec un biais de 0,6%, suivi du modèle général avec 0,8 % de biais. Après viennent les modèles *Rhizophora racemosa*, *Rhizophora harrisonii* et *Rhizophora spp*, avec chacun 0,9% de biais.

Le classement est tout autre en tenant compte du r^2 ajusté. En effet, selon ce dernier, la première place revient modèle *Rhizophora harrisonii*, qui a un taux de 99% de détermination. Il est suivi du modèle général avec 98 % de taux de détermination. Ensuite, viennent tour à tour les

Avicennia germinans, *Rhizophora racemosa* et *Rhizophora spp* avec respectivement 97 pour le premier modèle et 95 % de détermination pour chacun des deux derniers modèles. Par contre le critère d'information d'Akaike (AIC) classe toujours *Rhizophora harrisonii* en tête de liste avec un AIC de 16 ; mais, il change la suite du classement en conférant la deuxième place au modèle de *Rhizophora racemosa* avec 27 AIC suivi du modèle *Rhizophora spp* qui a une valeur AIC de 35. Ensuite viennent les modèles *Avicennia germinans* avec 40 AIC, et le modèle général avec 168 AIC. Le modèle *Rhizophora harrisonii* est toujours en tête selon le critère de l'erreur standard estimé avec 0,26 SEE. Ce dernier traduit l'écart des résidus et la droite de régression. Après vient le modèle *Avicennia germinans* avec 0,33 SEE. Le modèle général en boîte le pas avec 0,41 SEE suivi du modèle *Rhizophora spp* qui 0,46 SEE. Et pour finir il y'a le modèle *Rhizophora racemosa* qui a 0,51 SEE (Tableau 15, ci-après). En général, il ressort que le modèle prédiction de biomasse de *Rhizophora harrisonii* est classé meilleur par les critères r^2 , AIC et SEE. Ce même modèle occupe le troisième rang selon l'appréciation du pourcentage de biais. Examinons maintenant la distribution de variances des présents modèles.

Tableau 15 : Modèles de prédiction de biomasse et leurs critères d'appréciation

Espèces	Equations	RMSE	BIAS	BIAS%	R ²	R ² adj	AIC	SEE
Général	AGB=0.0000725D ^{2.68}	1.60E-06	3.00E-07	0.8	0.98	0.98	168	0.41
<i>Rhizophora racemosa</i>	AGB=0.0000464D ^{2.85}	1.40E-06	4.00E-07	0.9	0.95	0.95	27	0.51
<i>Rhizophora harrisonii</i>	AGB=0.0000491D ^{2.85}	1.30E-05	4.00E-07	0.9	0.99	0.99	16	0.26
<i>Rhizophora spp</i>	AGB=0.000112D ^{2.52}	3.00E-07	1.00E-06	0.9	0.95	0.95	35	0.46
<i>Avicennia germinans</i>	AGB=0.000197D ^{2.37}	1.40E-05	9.00E-07	0.6	0.97	0.97	40	0.33

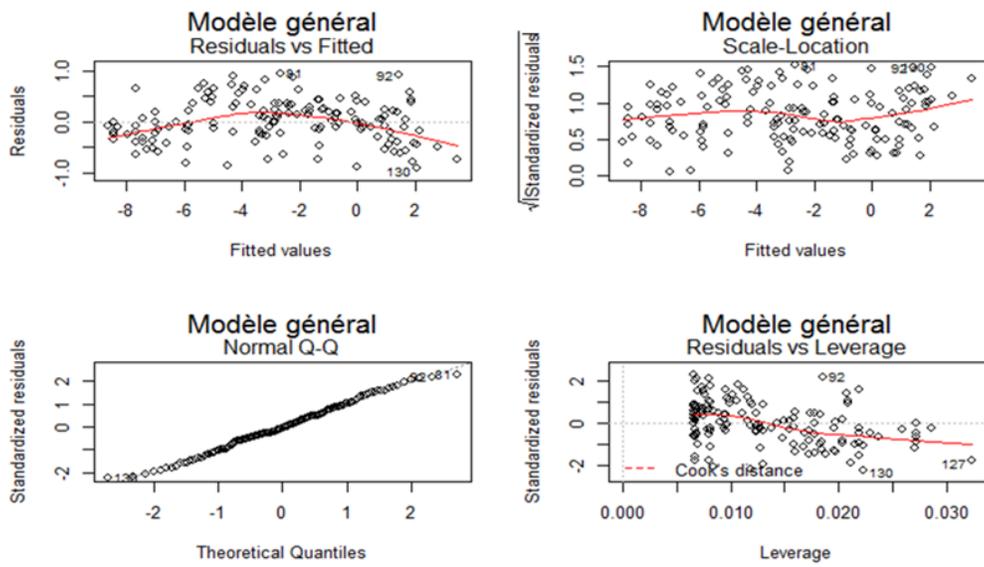
Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

La distribution des résidus du modèle général tend vers l'horizontal avec des points repartis tout au long de l'axe de régression. De plus, la distribution est symétrique [-1 et 1]. Bien qu'une distorsion s'observe, ce qui est normal en présence d'un modèle non linéaire, le présent modèle peut prédire dans un intervalle de confiance. La distribution théorique des résidus suit une loi normale et ne transparaît aucune forme particulière, exemple : une forme entonnoir ou queue de comète. Toutefois, la distance de Cook présente 3 points leviers, à savoir : 92, 127 et 130 (Figure 36, ci-après).

Les résidus *Rhizophora racemosa* sont asymétriques [-4 et 2] et traduisent une forme particulière. Bien que le r^2 de ce modèle soit hautement significatif avec 95% de détermination et un

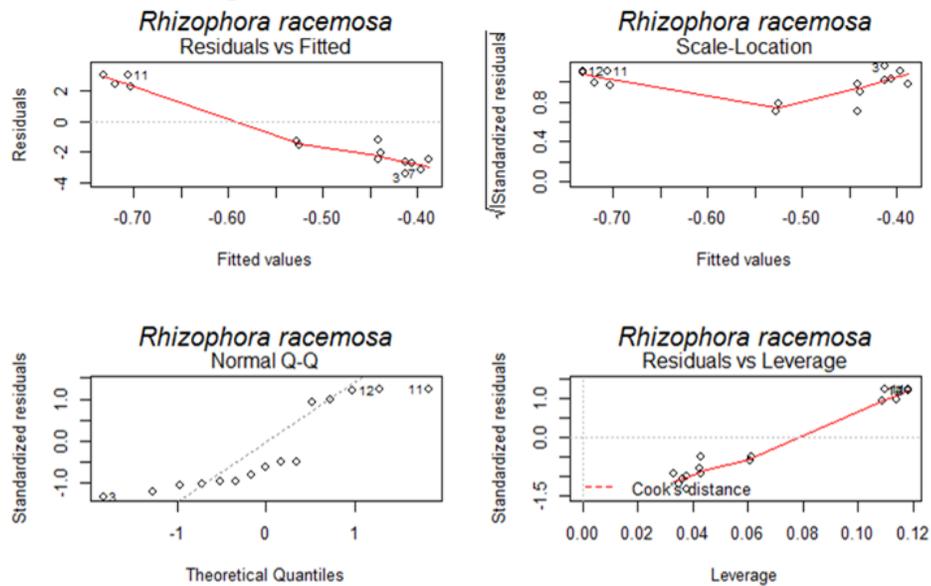
AIC de 27 ce modèle ne peut pas être utilisé ; car, sa distribution résiduelle est dépendante et non aléatoire (Figure 37, ci-après). Il est préférable de l'améliorer en ajoutant des données ou une deuxième variable indépendante.

Figure 36: Paramètre d'appréciation graphique du modèle général de prédiction de biomasse (AGB)



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

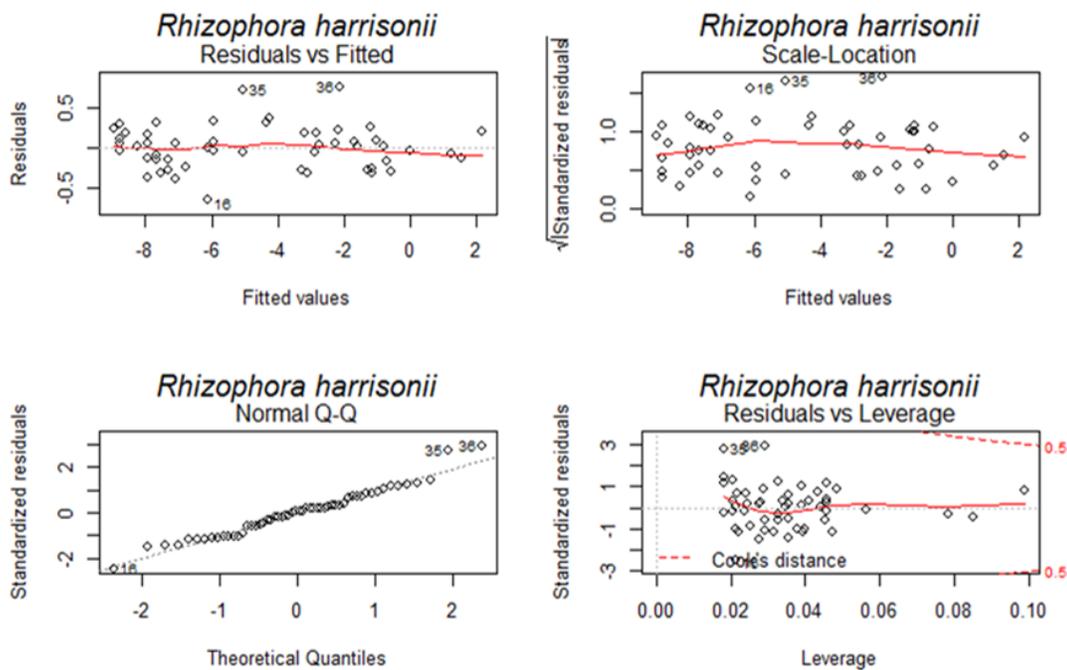
Figure 37: Paramètre d'appréciation graphique du modèle de prédiction de biomasse (AGB) de *Rhizophora harrisonii*



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Le modèle *Rhizophora harrisonii* a des résidus symétriques [-0,5 et 0,5] avec des points résiduels aléatoirement distribués. Les résidus sont homogènes. Ce modèle est apte à prédire dans un intervalle de confiance. La distribution théorique des résidus suit une loi normale avec une distorsion en bas à gauche et une autre en haut à droite. Toutefois, Ce modèle présente 3 points leviers 18, 35 et 36. La limite de Cook est respectée dans l'ensemble. La première tendance où les critères r^2 ajusté 95%, AIC 27 et SEE 0,26 plaçaient le modèle *Rhizophora harrisonii* en tête de meilleures performances se confirment avec la distribution des résidus (Figure 38, ci-après).

Figure 38: Paramètre d'appréciation graphique du modèle de prédiction de biomasse (AGB) de *Rhizophora racemosa*

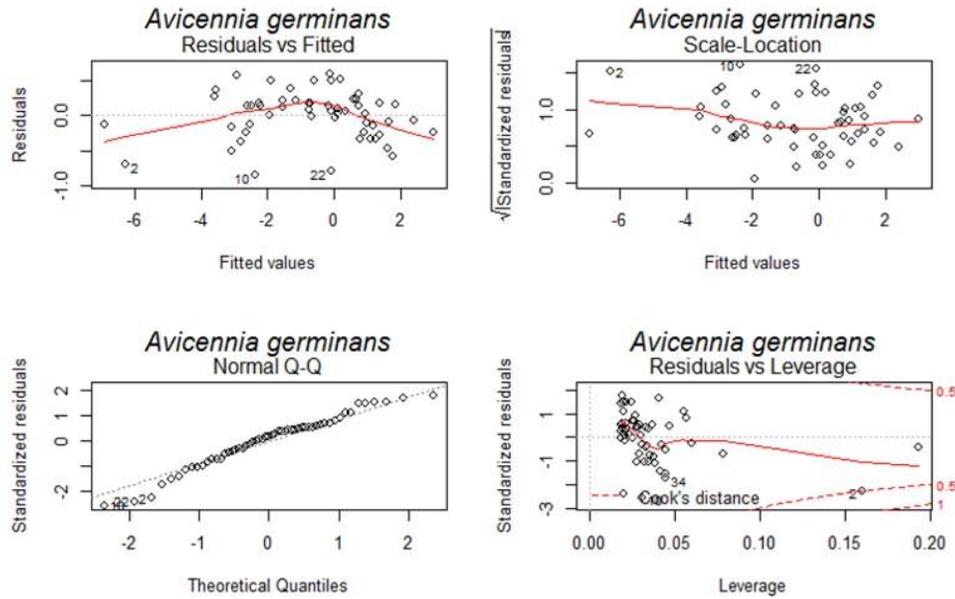


Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Le modèle *Rhizophora spp* tend vers une distribution résiduelle horizontale avec des inflexions aux deux extrémités. Il est observé les points leviers 6 et 18. Toutefois la distribution des quantiles théoriques suit une loi quasi normale avec une distorsion en bas à gauche lié levier 16 et une autre distorsion en haut à droite liée à la valeur 18. Cette influence se traduit également dans la distance de Cook. Il en est de même pour le modèle *Avicennia germinans*, celui-ci tend vers une distribution quasi symétrique [-1 et 0,75]. La distribution est tendancielle, mais suit une loi normale. Il est observé une distorsion en bas à gauche dû au point levier 2 et 22. La distance de Cook

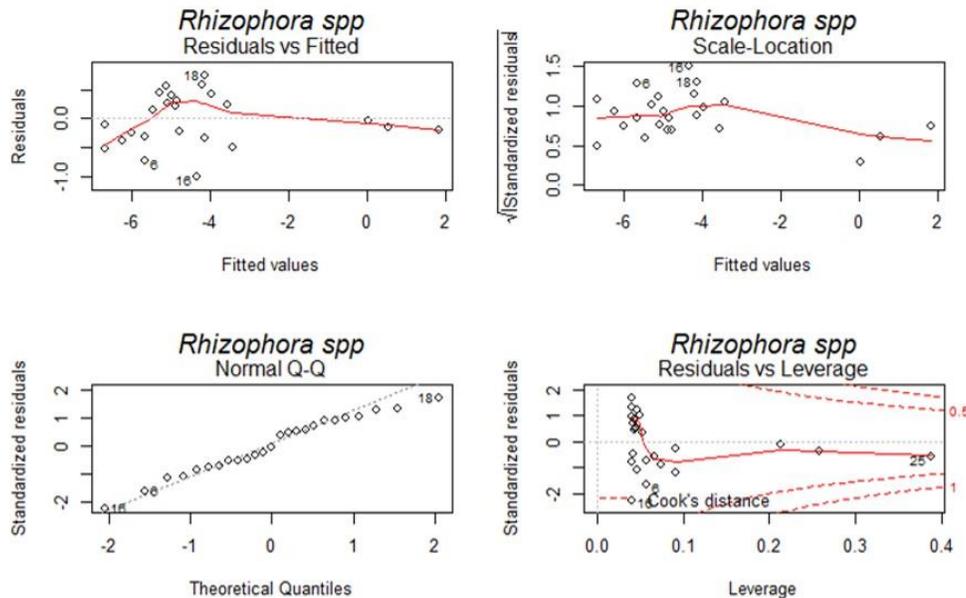
est respectée, mais présente les points 2 et 35 comme influent dans le modèle (Figure 39 et 40, ci-après).

Figure 39 : Paramètre d'appréciation graphique du modèle de prédiction de biomasse (AGB) d'*Avicennia germinans*



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Figure 40 Paramètre d'appréciation graphique du modèle de prédiction de biomasse (AGB) de *Rhizophora spp*



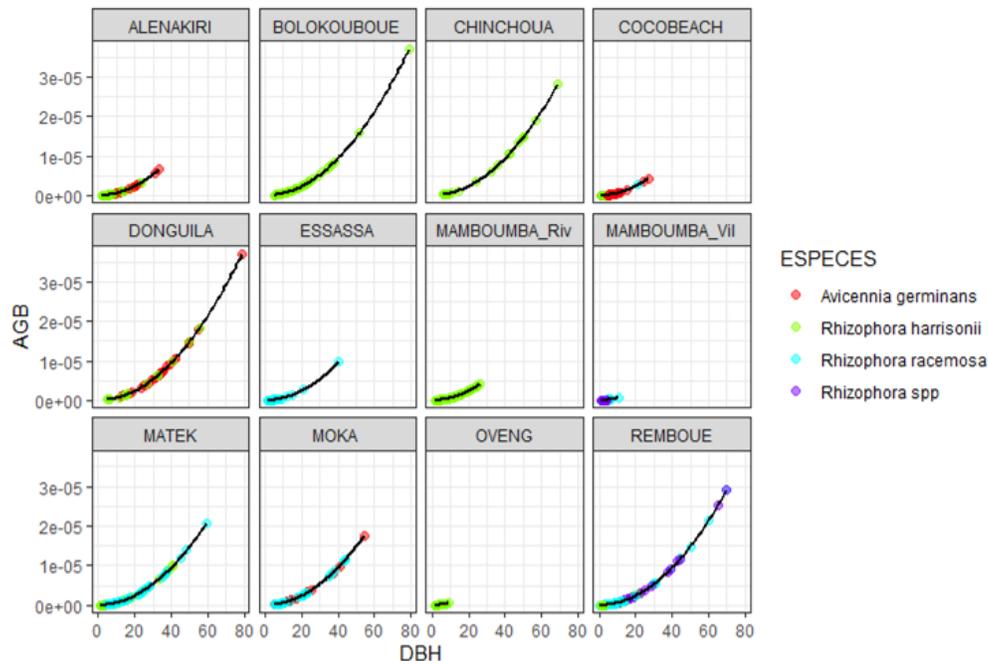
Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

4.2. Tendance des modèles selon les sites et les espèces

Les modèles par site et par espèce sont non linéaires. Par contre, c'est l'intervalle de prédiction qui diffère d'un site et d'une espèce à l'autre. En effet, Alénakiri a un DBH de prédiction potentiel entre [1 - 38 cm]. Tandis que Donguila et Bolokouboué ont un DBH potentiel de prédiction de [1 - 80 cm]. Remboué et Chinchoua ont un DBH potentiel de prédiction de [1 - 70 cm]. De même, Matek et Moka ont un DBH potentiel prédictif respectif de [0,5 - 55 cm] et [1 - 40 cm] ; sans oublier Essassa dont le DBH potentiel de prédilection oscillent entre [0,5 - 40 cm]. Mamboumba village, Mamboumba rivière, Cocobeach et Oveng ont pour DBH potentiel prédictif respectif [0,5 - 20 cm], [0,5 - 15 cm], [0,5 - 30 cm] et [0,5 - 10 cm].

Il ressort que *Rhizophora harrisonii* est présent sur 8/12, tandis qu'*Avicennia germinans* sur 4/12, soit un taux de présence respectif de 67% et 33%. Cocobeach est plus diversifié en termes d'espèce. Il y est observé toutes les espèces du genre *Rhizophora*, et ainsi que l'espèce *Avicennia germinans*. Selon cet échantillonnage, Bolokouboué, Donguila et Remboué regorgent des individus de plus gros diamètres. Par la même occasion, ils détiennent les plus fortes concentrations de biomasse (Figure 42, ci-après).

Figure 41: Type de relation AGB et DBH par site



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Les classes de diamètres prises en compte sont comprises entre 0,7 et 79 cm pour *Rhizophora harrisonii* et *Rhizophora racemosa*, et 3 à 78 cm pour *Avicennia germinans*. Toutefois, comme dans la plupart des cas, le nombre des arbres diminue avec l'accroissement du diamètre (Brown, 1997). Selon la littérature, les modèles de *Rhizophora* et *Avicennia* avoisinent rarement les limites des diamètres préconisés dans les mangroves observées dans les estuaires au Gabon (Fromard et al., 1998 ; Komiyama et al., 2008 ; Kauffman et al., 2011). En effet, dans le modèle de Fromard et al. (1998) développé en Guyane Française, le diamètre le plus élevé est 42 cm pour *Avicennia germinans* et 32 cm pour *Rhizophora spp.* En Floride (USA), le diamètre maximal est de 21,5 cm pour *Avicennia germinans* et 20 cm pour *Rhizophora mangle*, selon le modèle de Smith et Whelan (2006). Le modèle général de Komiyama et al. (2005), élaboré en Asie du Sud-Est, a un diamètre maximal de 49 cm. Ajonina et al. (2014) a établi un modèle général pour la zone Afrique centrale, avec un diamètre maximal de 102,8 cm. Les modèles, que nous avons établis, ont des diamètres maximaux 79 et 78 cm respectivement pour les genres *Rhizophora* et *Avicennia*. Il ressort que les mangroves du Gabon ont des diamètres plus importants que ceux d'Asie et de Guyane Française déjà cubés. Ainsi, se dégage une différence entre la région de calibration du modèle et la région où il est utilisé pour combler l'absence d'un modèle local d'évaluation de biomasse des mangroves.

Une similarité de prédiction est observée entre les biomasses prédites par nos modèles et le modèle d'Ajonina et al. (2014). Les prédictions faites par le modèle de Husch et al. (2003) sont entendues ici comme nos observations. Elles obéissent à la même allure, mais elles sont moins structurées. Par contre, les prédictions des modèles sont structurées et obéissent à la loi puissance. Un modèle est meilleur lorsque le biais en % est proche de 0. Ainsi, la marge d'écart entre la biomasse observée et la biomasse prédite est de -0,17 % pour le modèle (*Avicennia germinans*), de -0,10 % pour le modèle (*Rhizophora harrisonii*) et -0,45 % pour le modèle (*Rhizophora racemosa*). L'écart entre les prédictions des modèles *Avicennia germinans*, *Rhizophora harrisonii*, *Rhizophora racemosa* et le modèle d'Ajonina et al. (2014) est respectivement de -0,87, -0,10 et -0,83 %. Enfin, la différence entre le modèle d'Ajonina et al. (2014) et les observations de terrains est respectivement de 0,17, -0,24, -0,51 % de biais. Au regard de ce qui précède, les modèles *Avicennia germinans*, *Rhizophora harrisonii* et *Rhizophora racemosa* surestiment de l'ordre respectif de 0,26, 0,15 et 0,28 tonnes par rapport aux observations de terrains. Tandis que le modèle d'Ajonina et al. (2014) a une différence de 0,04 tonnes pour *Avicennia germinans*, de -0,07 pour

Rhizophora harrisonii et une différence de -0,021 tonnes chez *Rhizophora racemosa* par rapport aux observations de terrains. En rapport avec les modèles *Avicennia germinans*, *Rhizophora harrisonii*, *Rhizophora racemosa* et le modèle d'Ajonina et al. (2014), il y a une différence respective de 0,34 tonnes chez *Avicennia germinans*, 1,32 tonnes chez *Rhizophora harrisonii* et de 0,10 tonnes pour *Rhizophora racemosa*. Grosso modo, le modèle d'Ajonina et al. (2014) surestime la biomasse de *Rhizophora harrisonii* et *Rhizophora racemosa* et sous-estime la biomasse chez *Avicennia germinans*. La surestimation s'observe à partir de 28 cm de DBH pour le modèle *Rhizophora harrisonii*, et de 25 cm de DBH pour le modèle *Rhizophora racemosa*.

En définitive, 13 équations allométriques de prédiction au sol ont été établies dans ce chapitre. Il s'agit de 3 modèles allométriques pour la prédiction de hauteur. Il s'agit, notamment, d'un modèle général, d'un modèle de *Rhizophora harrisonii* et un modèle de *Rhizophora racemosa*. Ces trois modèles allométriques ont, respectivement, un taux de détermination de 79, 92 et 69% et une marge d'erreur respective de -0,09, -0,24 et 0,01%.

Aussi, s'agit-t-il également de 5 modèles allométriques de prédiction de volume. Il est question d'un modèle de type général, un modèle pour *Rhizophora harrisonii*, un modèle pour *Rhizophora racemosa*, un modèle pour *Rhizophora spp* et un modèle pour *Avicennia germinans*. Le taux de détermination de volume de l'ensemble de ces modèles est compris entre 95 et 99%.

Enfin dans le même ordre que précédemment, il s'agit de 5 modèles allométriques de prédiction de biomasse. Leur taux de détermination de la biomasse est également compris entre 95 et 99%, soit une moyenne de $96 \pm 0,008\%$. De même, ils possèdent une erreur résiduelle d'ensemble de $0,39 \pm 0,04$. Toutes ces équations, aussi bien au sol que par télédétection, ont la particularité d'être sous la forme logarithmique : $y=ax^b$.

Il était question ici des équations allométriques de prédiction de la biomasse au sol et sur des petites formations de mangrove. Toutefois, quand les formations de mangrove à couvrir sont des grandes étendues, le GIEC préconise de faire recours à la télédétection optique ou radar. Ceci est l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE IV: Équation allométrique par télédétection

Le suivi de la biomasse et du carbone des mangroves, comme celle des autres formations forestières, sur des grandes étendues nécessite l'usage de la télédétection optique ou LiDAR. En effet, dans le cadre national, régional ou sous-régional, la télédétection permet de minimiser l'effort, le temps de travail et les coûts d'échantillonnage dans l'environnement de mangrove. Ainsi, le présent chapitre est consacré à la mise en place des équations allométriques prédiction de la hauteur, de la biomasse et du carbone par l'intermédiaire de la télédétection comme le recommande le REED+.

1. Hauteur des mangroves estuariennes

1.1. Relation SRTM et hauteur de mangrove terrain

L'un des indicateurs le plus utilisé dans l'estimation de la biomasse et le carbone forestier est la hauteur à partir des images radar. Celle-ci permet d'obtenir la hauteur de la canopée et donne une idée du DBH des individus, à partir de leur hauteur et de leur couronne. La hauteur par télédétection est fournie par le SRTM . Or, selon nos estimations, la différence moyenne entre les valeurs du SRTM et les hauteurs sur terrain est de 5,15 m pour les mangroves de l'estuaire du Gabon. Cette différence est de 4 m au Nigeria et 1,5 m au au Mozambique (Fatoyinbo et *al.*, 2013). Fort de ce constat, trois modèles ont été testés pour estimer la hauteur des arbres de mangroves en fonction du SRTM.

1.2. Calibration et choix du meilleur modèle

Le r^2 ajusté de l'ensemble des modèles varie entre 0,73 et 0,86 ; soit une moyenne de 0,80. L'erreur standard résiduelle moyenne est de 2,47 ; tandis que le critère d'information d'Akaike (AIC) moyen s'élève à 52,17. La plus grande valeur de l'AIC (107) est enregistrée par le modèle 1. Il en est de même de l'erreur standard résiduelle (6,48) et le plus grand taux de détermination (0,86). Le modèle 2 dispose de la plus petite erreur moyenne, soit 1,96 m pour un biais de 0,53, soit -0,29 % pour un AIC de 28,5 et un r^2 ajusté de 0,73. Le modèle 3 quant à lui a le plus petit AIC (21), mais il détient la grande erreur standard moyenne (5,28 m), le plus grand biais (-4,35

m), soit -0,96 % de biais. Il ressort que les trois modèles testés ont tous un r^2 ajusté $> 0,70$. Leur capacité de prédiction est hautement significative (Tableau 16, ci-après).

Tableau 16 : Modèles de prédiction des hauteurs par télédétection et leurs paramètres d'appréciation

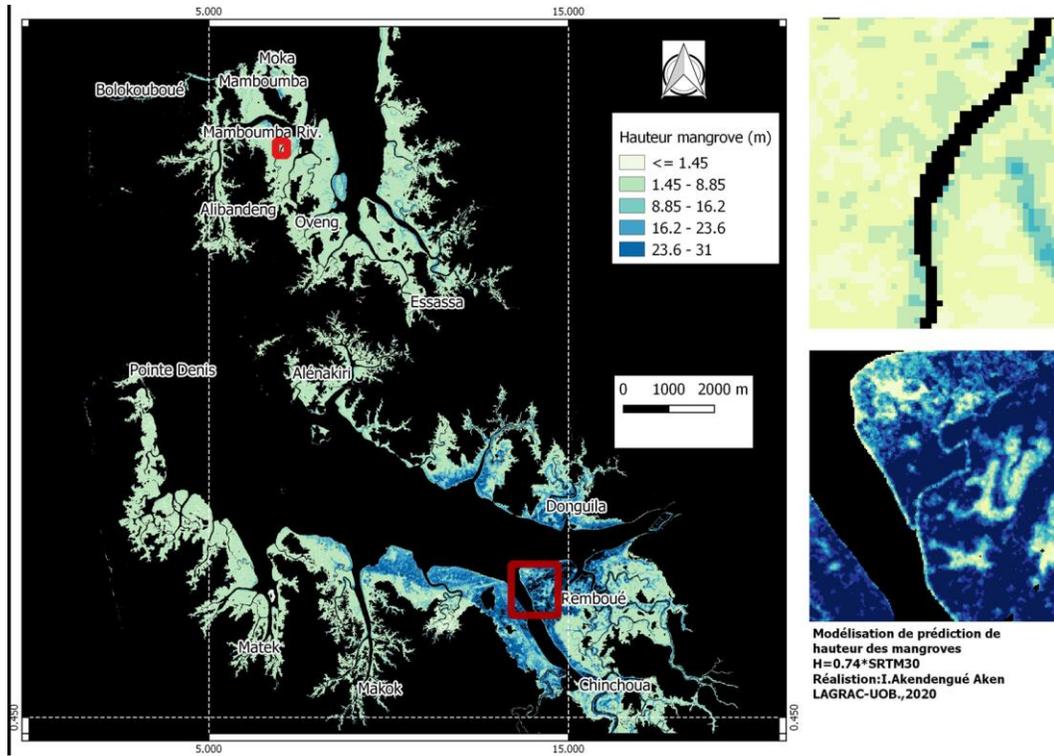
Equations	n	a	b	R ²	R ² aj	RST	AIC	RMSE	Biais	Biais(%)
$H=0,74*srtm$	17		0,74	0,87	0,86	6,48	107	3,7	-2,8	-0,68
$H=2,51*e^{0,068*srtm}$	17	2,51	0,068	0,75	0,73	0,52	28,5	1,96	0,53	-0,29
$H=srtm^{0,9095}$	17		0,9095	0,82	0,80	0,4	21	5,28	-4,35	-0,96

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

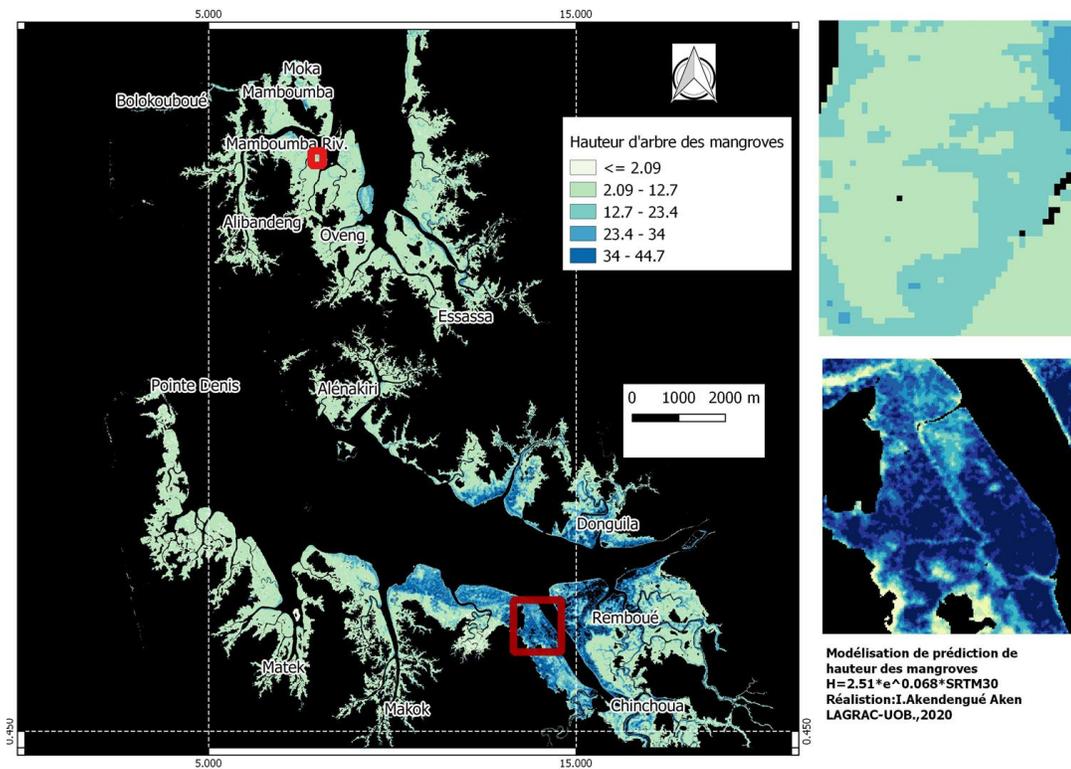
1.3. Validation des modèles

Les indicateurs de performance des modèles présentent le modèle 2 ($H = 2,51 * e^{0,068 * SRTM}$) comme étant le meilleur. Il a les plus petites valeurs en termes d'erreur standard résiduelle (RST), d'erreur quadratique moyenne (RMSE) et en termes de biais. Toutefois, les deux autres modèles $H = 0,74 * SRTM$ et $H = SRTM^{0,9095}$ ont été également traduits en carte. Cette opération permet de déceler s'il ya un déplacement de zone de la plus haute mangrove ou de la plus basse mangrove d'un modèle à l'autre. A cet effet, peu importe le modèle, il ya des similitudes sur les zones caractéristiques. Notamment, les zones de la Remboué et Agouma sont identifiées par l'ensemble des modèles comme abritant les mangroves les plus hautes. Les modèles diffèrent au niveau des valeurs prédites. Par exemple, le modèle 1 ($0,74 * SRTM$) peut prédire les mangroves ayant des hauteurs en dessous de 4 m, jusqu'à 2 m minimum et 32 m maximum. Le modèle 2 ($H = 2,51 * e^{0,068 * SRTM}$), quant à lui, a un spectre de prédiction minimum de 2,14 m et un spectre de prédiction maximum de 47,87 m. Le modèle 3 ($H = SRTM^{0,9095}$) a une prédiction minimale de 1,85 m et une prédiction maximale de 30 m. Les estimations du modèle tiré de la littérature ($H = 1,07 * SRTM + 1,70$), selon Fatoyinbo et *al.* (2013), sont comprises entre 4,75 m et 46,55 m; respectivement, comme cela est illustré sur les cartes 10 à 13, ci-après, pour les quatre modèles de hauteur susmentionnés.

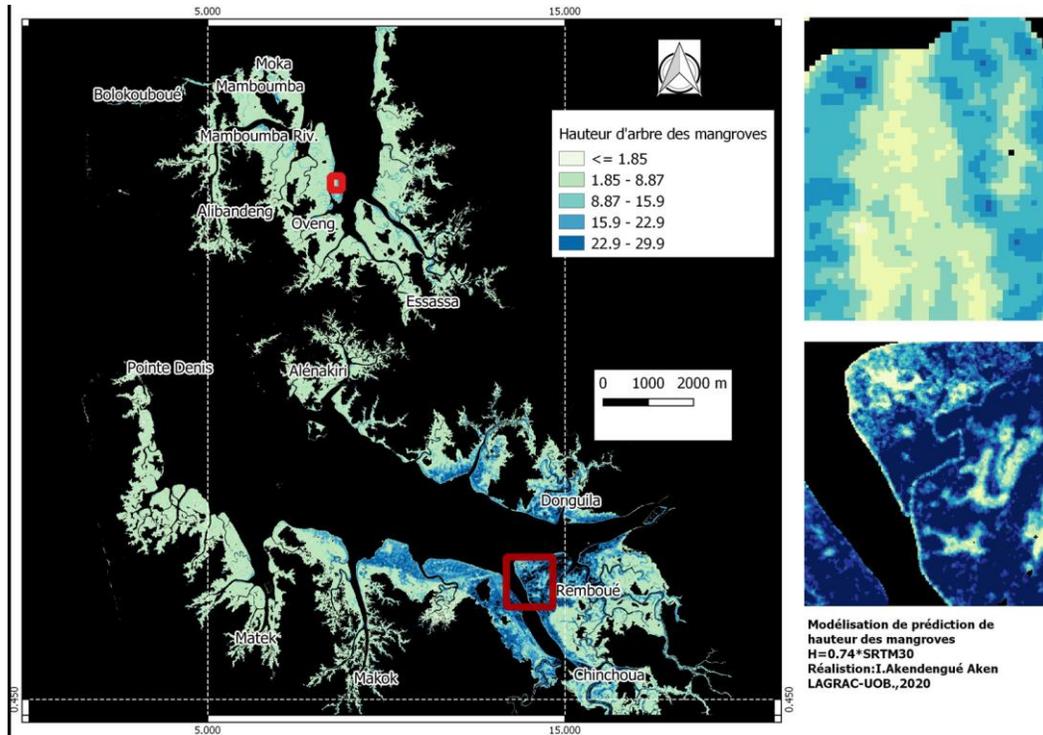
Carte 10 : Hauteurs prédites par télédétection à partir du modèle 1



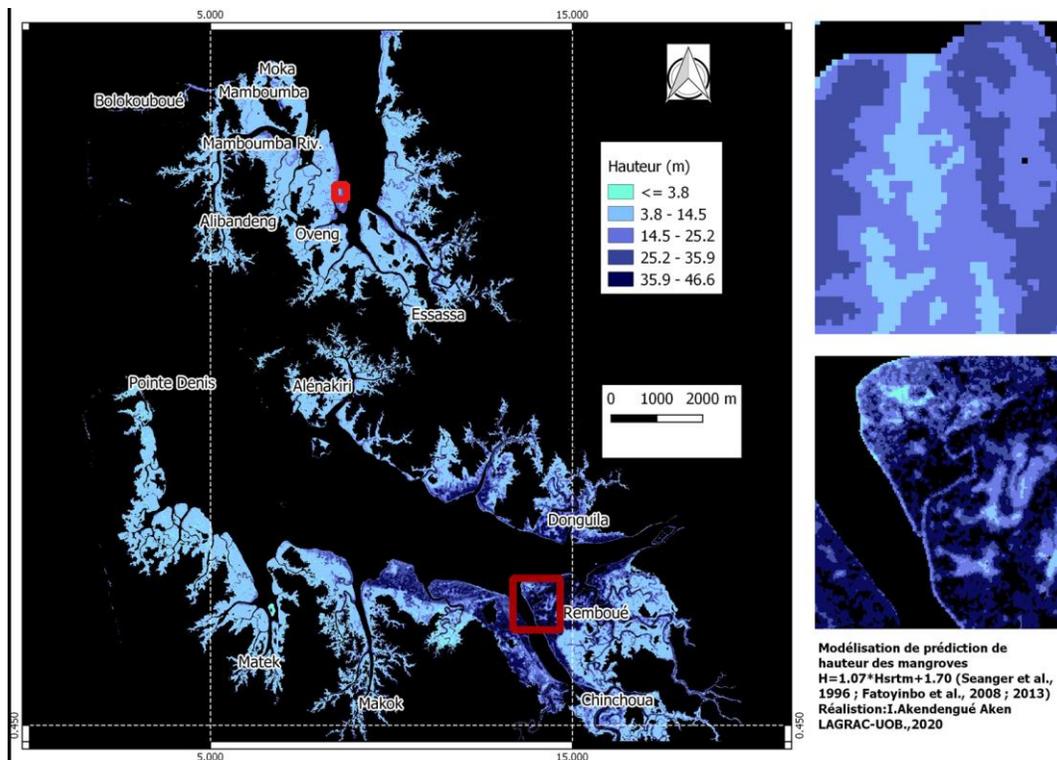
Carte 11 : Hauteurs prédites par télédétection à partir du modèle 2



Carte 12 : Hauteurs prédites par télédétection à partir du modèle 3



Carte 13 : Hauteurs prédites par télédétection à partir du modèle tiré de la littérature



1.4. Les mangroves estuariennes les plus hautes

La région sud Remboué est identifiée par tous les modèles comme ayant les mangroves les plus hautes. Dans la zone nord-est (Akanda) sont identifiées des mangroves de 28 m de hauteurs selon les modèles 2 et 26 m selon le modèle de Fatoyinbo et *al.* 2013. Les régions ouest de Pongara (sud de la pointe Denis) et Alibandeng sont dominées par des mangroves comprises entre 2 et 10 m de hauteur. Par contre, dans la région d'Owendo (Alénakiri) on retrouve les mangroves de 19 et 27 m qui dominent. D'une manière générale, de la pointe Denis à Kango, il s'observe une opposition phytogéographique des mangroves. En effet, de l'aval en partant vers l'amont on remarque une gradation de la hauteur des mangroves. Peu à peu les « géohorizons » de 2, 10, 19 et 28 m laisse place à des «géohorizons» de 36 et 44 m de hauteur. Le type de sol, la salinité, le pH semble être à l'origine de ce phénomène. Nous en saurons un peu plus dans la partie dédiée au facteur de spatialisation. Vue la prépondérance des espèces d'eau douce environnante (palmier raphia), Lebigre (1990) avait émis plusieurs hypothèses pour expliquer ce phénomène : notamment l'influence fluviale et marine et influence tectonique.

1.4.1. L'influence fluviale et marine

L'influence fluviale et ou marine sur la salinité des sols pour la partie aval et amont. En fait, selon Lebigre (1990) les sols de la partie aval restent salés en permanence suite à l'influence des courants marins tandis que ceux de la partie amont se désalinisent peu à peu à partir de l'apport en eau douce du fleuve supérieur à l'apport marine. Donc, la partie aval s'enrichit en tanne pendant que la partie amont gagne en marais. La première constitue une mangrove progressive tandis que la seconde forme une mangrove régressive. De la pointe Egirigi à la pointe Mpongwé les mouvements de subsidences n'ont pas été comblés par les sédiments par manque de cours d'eau notable et de bilan sédimentaire positif. Cela expliquerait l'absence de grand *Rhizophora* en front. Et comme le courant marin est supérieur au courant fluvial, on assiste à une colonisation des tannes liée à la salinité excédent parfois 25 (g/l) en saison sèche ; tandis qu'elle est entre 25 et 30 (g/l) à Owendo et de 15 (g/l) à Donguila.

1.4.2. L'influence de la tectonique

La présence des grands *Rhizophora racemosa* dans la Remboué et la Maga fait suite à une subsidence de la partie méridionale de l'estuaire en faveur d'une surrection de la partie septentrionale où se situe Libreville. Ce phénomène géologique se serait produit avant l'Holocène (Lebigre, 1990 ; Mombo, 1991), période où se sont formés le colmatage des marais. La subsidence a favorisé l'envasement cette partie de l'estuaire. Peu à peu la subsidence a été comblée par l'apport sédimentaire fluvial. Ainsi, ces zones ont été colonisées au fil du temps par des futais de *Rhizophora racemosa*. Le courant fluvial étant supérieur au courant marin dans cette partie de l'estuaire, les espèces d'eau douce se sont installées. Cela a entraîné une juxtaposition de marais aux mangroves.

1.5. Modèle numérique de canopée des mangroves estuariennes

▪ Section Remboué

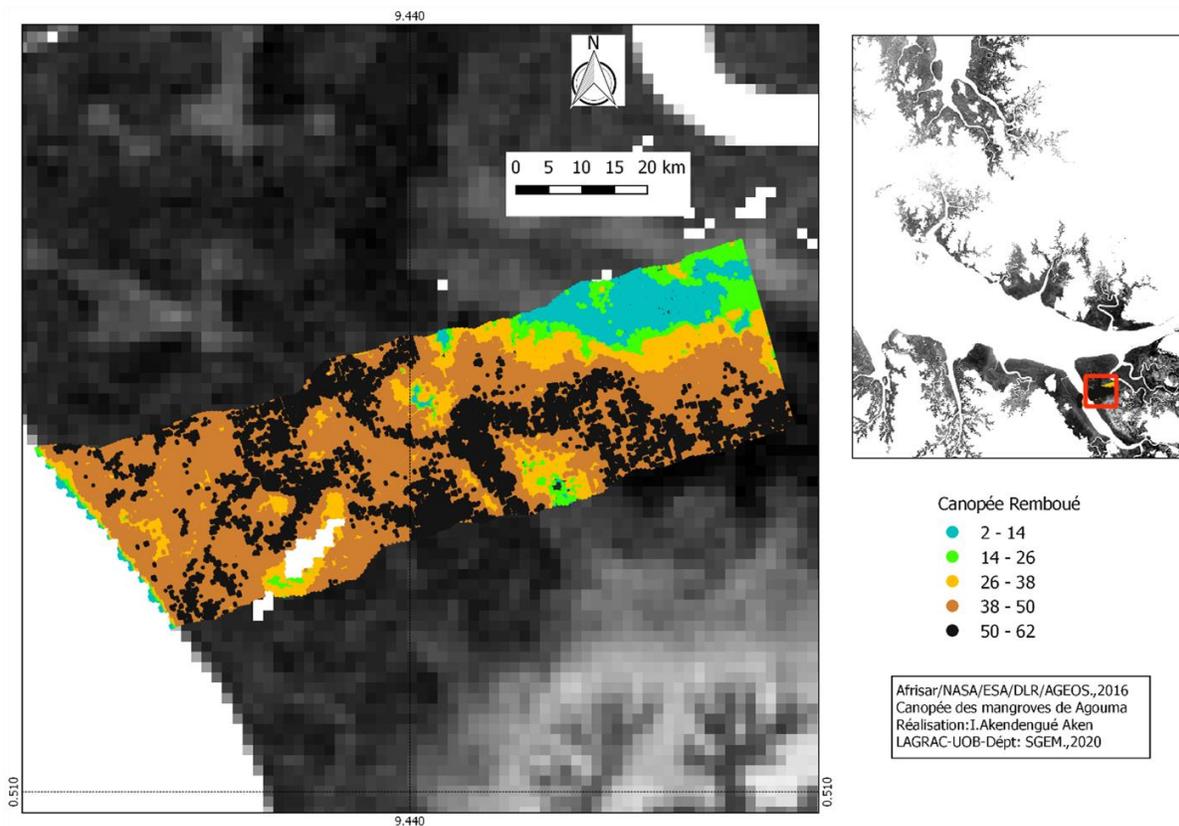
Le modèle de canopée représente la hauteur des arbres à partir des levés de la campagne Afrisar conjointe NASA / ESA / DLR / AGEOS. Les hauteurs dans ce secteur de la Remboué varient entre 2 et 62 m. Aussi, la moyenne (μ) de hauteur est de 41,33 m avec 28 m et 54 m de premier et deuxième quartile (σ) respectif. Cela illustre que 50 % de hauteurs des mangroves de la Remboué sont comprises entre 28 et 54 m et 25 % comprises entre 2 et 28 m contre 25 % comprise entre 50 et 62 m. De ce fait, le faciès de 38 à 50 est le plus répandu suivi du faciès 50 à 62 m. Ensuite, vient le faciès 2 à 14 m et le faciès 14 à 26 m. Ainsi, la région de la Remboué est dominée par un faciès de mangroves standards et mûres (Carte 14 et Histogramme 5, ci-après). Ces hauteurs sont supérieures à celles rencontrées au Nigéria et au Cameroun où la hauteur maximum est 45 mètres, ainsi qu'au Kenya et en Tanzanie où la hauteur maximale est de 30 mètres (Fatoyinbo et al., 2013).

La structure de hauteur des mangroves de la Remboué présente une asymétrie à gauche, négative et leptokurtique à longue queue, donc une structure en cloche. L'observation de plus de 500 arbres à l'hectare qui ont moins de 40 m de hauteur est un phénomène rare sur une structure qui cumule jusqu'à 1750 individus à l'hectare. Les arbres compris entre 48 m et 50 m de hauteur

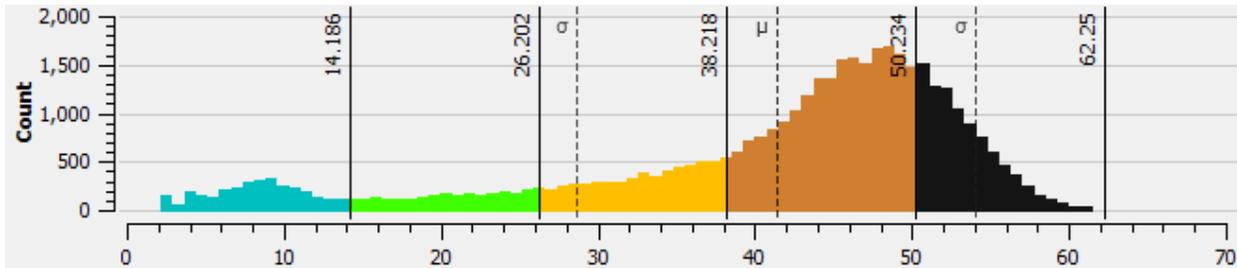
sont les plus nombreux par hectare avec un pic de 1750 arbres. Dans ce site dominé par le *Rhizophora racemosa* les plus petits arbres ont 2 m de hauteur et couvrent une densité de 200 arbres à l'hectare. Ils représentent alors un taux de densité de 11,42 % par rapport à la densité totale.

Plusieurs hypothèses sont émises pour expliquer l'absence d'arbre entre 0,1 et 2 m de hauteur. La première est liée au manque de régénération causée par le flux de marée qui emporte toutes les propagules. La deuxième liée à une croissance rapide des individus dans la classe 0,1 et 2 m et qui stagnent leur croissance après avoir atteint le stade de 2 m de hauteur pour de raison de compétition intra-spécifique. En effet, parmi les stratégies élaborées par les végétaux en cas de compétition il y'a l'accélération ou la stagnation de croissance pour la préservation des ressources, pour lutter contre des conditions écologiques peu favorables (Greenslade, 1983).

Carte 14 : Hauteurs obtenues par télédétection à partir du LiDAR ; transect de la Remboué



Histogramme 5 : Distribution des hauteurs obtenues par LiDAR à la Remboué

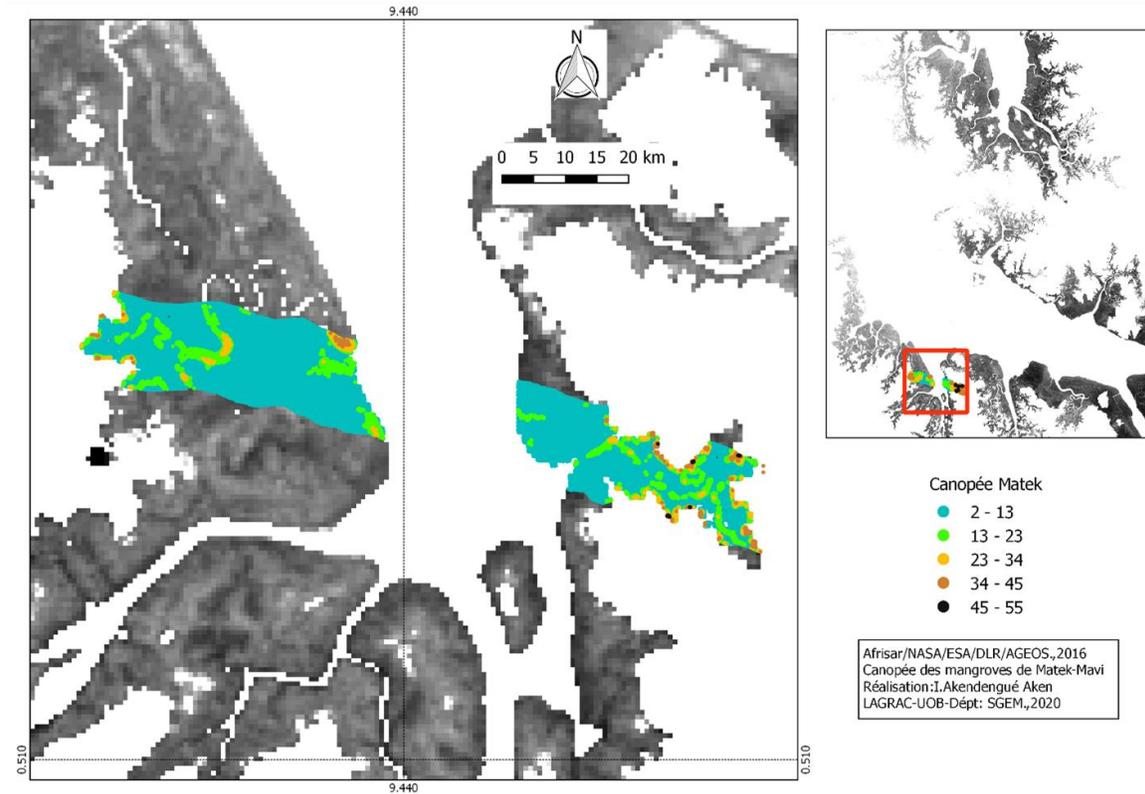


Réalisation : Igor Akendengué Aken 2020. Données : Afrisar/NASA/ESA/DLR/AGEOS.,2016

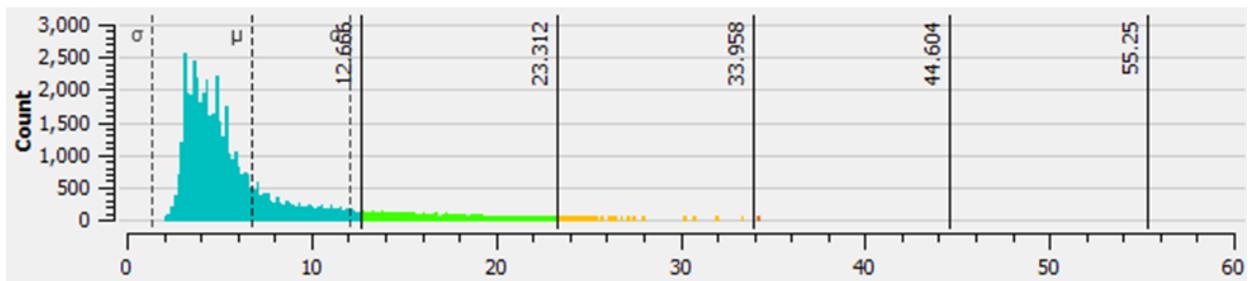
▪ Section Matek-Mavi

Les mangroves du secteur de Matek-Mavi ont des hauteurs comprises entre 2 et 55 m. De ce fait, la moyenne (μ) de hauteur est de 6,71 m avec 3,8 m de quartile 1 (σ) et 6,85 m de quartile 2 (σ). Cela signifie que 50% de mangroves dans ce secteur ont une hauteur comprise entre 4 et 7 m. Par ailleurs, 25 % autres sont entre 2 et 4 m, tandis que 25 % des mangroves restantes sont comprises entre 7 et 62 m de hauteur. Alors, selon la moyenne ce secteur est constitué de faciès de mangroves dominé par la classe de perches [5-10]mètres bien que, des faciès portaux et standard y sont observés à certains endroits (Carte 15 et Histogramme 6, ci-après). Les mangroves de Matek-Mavi reflètent l'appartenance à une structure asymétrique à droite et leptokurtique à longue queue. Au-delà de 10 m de hauteur il n'est plus possible d'observer plus de 300 arbres par hectare pourtant la structure cumule jusqu'à 2600 arbres. Les arbres de 3 m de hauteur sont les plus nombreux avec 2600 arbres par hectare. Les plus grands arbres sont entre 45 et 55 m de hauteur et représentent un taux de 11,55 % de la densité totale. Ce site à *Rhizophora harrisonii* a une prédominance relative d'arbre compris entre 0 et 10 m de hauteur. Vu la forme en L de l'histogramme si on le regroupe en classe et la rareté sans cesse décroissante au-delà de 10 m de hauteur, Matek-Mavi remplit les caractéristiques d'un site à individu en pleine croissance. Le faible taux de prédominance des arbres de grande hauteur laisse planer plusieurs hypothèses d'explication. Cela peut-être dû au fait que le site ne soit pas favorable au développement des individus à grande hauteur. Un autre fait pouvant expliquer ce phénomène est la caractéristique propre de l'espèce qui choisit de ne pas croître en hauteur et par même en diamètre pour de raison de compétition rude (Greenslade, 1983).

Carte 15 : Hauteurs obtenues par télédétection à partir du LiDAR ; transect de Matek



Histogramme 6 : Distribution des hauteurs obtenues par LiDAR à Matek



Réalisation : Igor Akendengué Aken 2020. Données : Afrisar/NASA/ESA/DLR/AGEOS.,2016

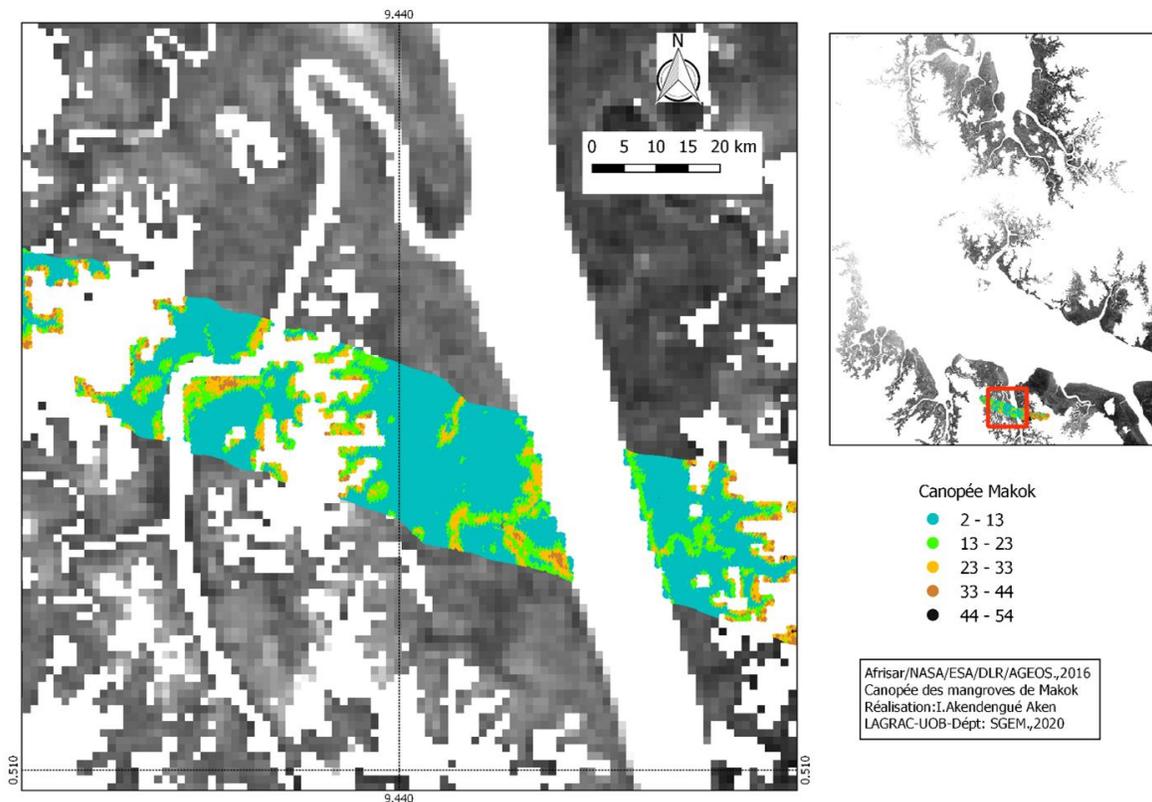
- Section Makok

Les mangroves du secteur de Makok ont des hauteurs comprises entre 2 et 60 m. De ce fait, la moyenne (μ) de hauteur est de 11,71 m avec 4,57 m de quartile 1 (σ) et 16,94 de quartile 2 (σ). Le critère de moyenne inscrit les mangroves de Makok dans une classe dominée par les Portaux [10-30[mètres de hauteur. Toutefois, un faciès standard [30-50[m est observé à certains endroits.

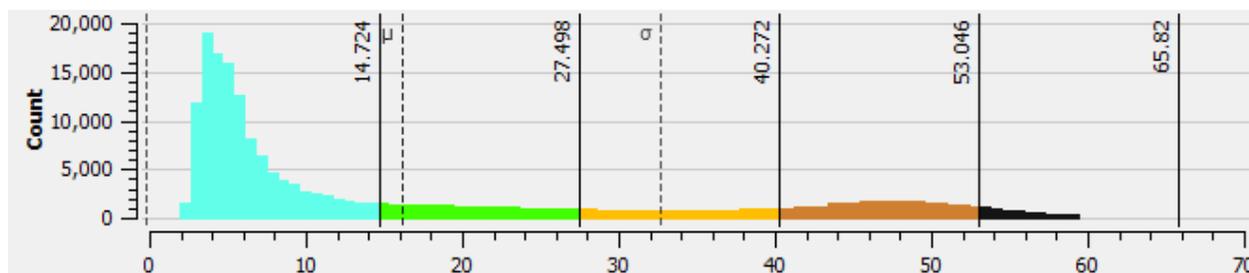
Cela signifie que 50 % de mangroves sont dans un faciès compris entre 1 et 33 m de hauteur. Par ailleurs, 25 % autres sont comprises entre 0,5 et 1 m de hauteur, tandis que 25 % des mangroves restantes sont comprises entre 33 et 54 m de hauteur (Carte 16 et Histogramme 7, ci-après).

La structure des mangroves de Makok est asymétrique à droite et de forme leptokurtique à longue queue. A 3 m de hauteur la structure cumule jusqu'à 19000 arbres à l'hectare, pourtant au-delà de 12 m de hauteur la densité d'individu par hectare n'est pas supérieur à 300. Par contre, de 2 minimum jusqu'au maximum qui est de 60 m hauteur aucune rupture n'est observable dans la structure malgré la prédominance relative dans la classe des individus de petite hauteur [2-10 m]. Cela est le témoignage d'un site à mangrove non perturbée par une action exogène. La forme en J-renversé caractérise un peuplement à fort potentielle de régénération. L'histogramme ne présente pas une allure uniforme de 2 à 60 m de hauteur certes, mais ces légères ondulations mettent en évidence une dynamique de hauteur. En effet, entre 28 m et 40 m la densité d'individus est stagnante à 100, tandis que de 41 à 53 m de hauteur, la densité atteint 300 arbres par hectare avant de redescendre à une densité moindre de 50 arbres à l'hectare au niveau du calibre de 60 m de hauteur.

Carte 16 : Hauteurs obtenues par télédétection à partir du LiDAR ; transect de Makok



Histogramme 7 : Distribution des hauteurs obtenues par LiDAR à Makok



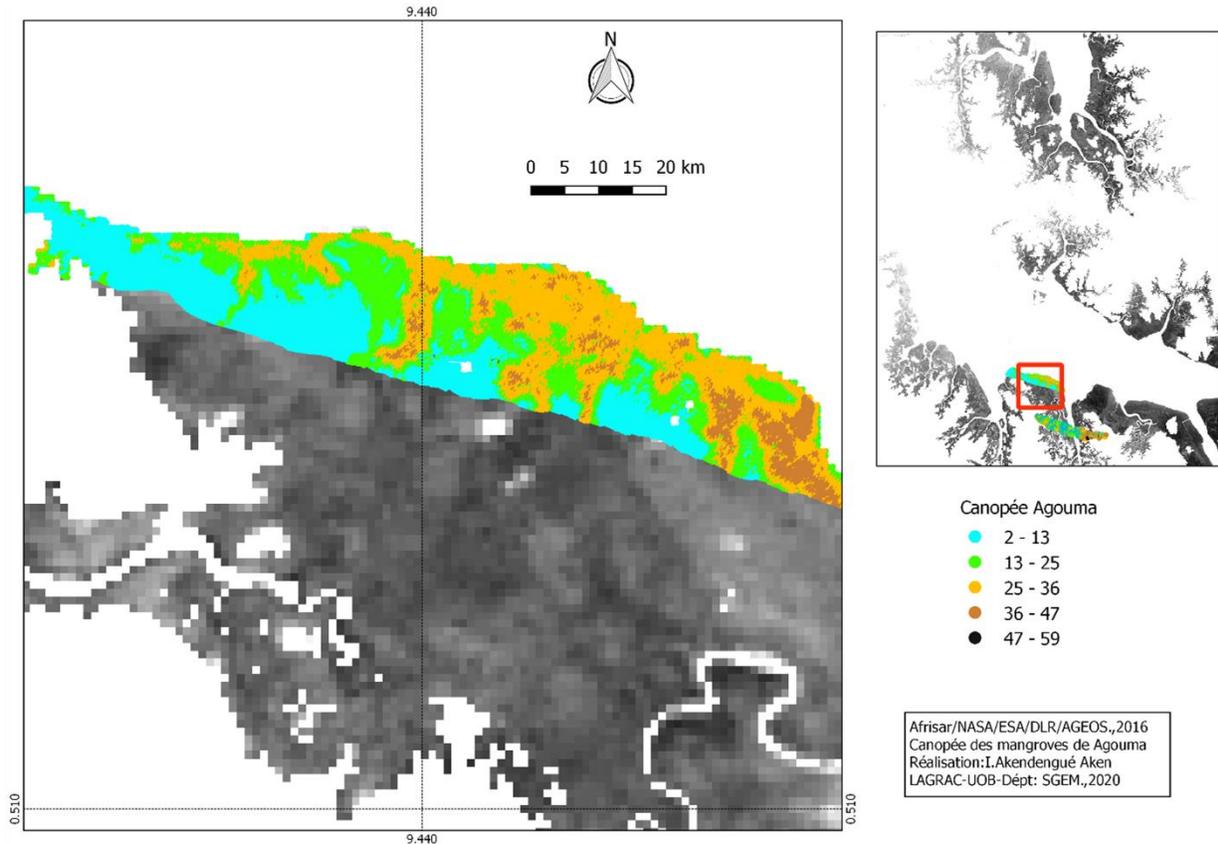
Réalisation : Igor Akendengué Aken 2020. Données : Afrisar/NASA/ESA/DLR/AGEOS.,2016

▪ Section Agouma

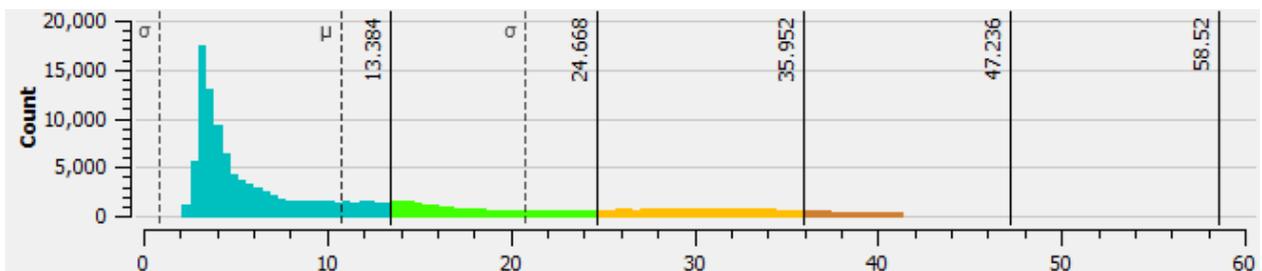
Les mangroves du secteur Agouma ont des hauteurs comprises entre 2 et 59 m. Avec une moyenne de 20 m de hauteur, la mangrove du secteur Agouma est dominé par la classe des portaux [10-30[. Toutefois, on y observe également la classe des standards et Maturées. Le secteur d'Agouma a ces deux derniers critères en commun avec le secteur de la Remboué. L'analyse du spectre transparait une succession de faciès de la mer vers le continent 31 m, 19 m en passant et 8 m de hauteur moyenne. Vers l'Est on y observe un faciès dominé par des individus de 53 m de hauteur moyenne (Carte 17 et Histogramme 8, ci-dessous).

D'un point de vue de la hauteur, les mangroves de l'Agouma ont une structure asymétrique à droite leptokurtique à longue queue. Les sujets de 3 m de hauteur cumulent à 17000 arbres par hectare. Toutefois, au-delà de 8 m de hauteur la densité n'atteint pas plus de 200 arbres par hectare. Ce site monospécifique à dominance *Rhizophora harrisonii* est caractérisé par une structure non monotone dans la dynamique des hauteurs. En effet, au-delà de 42 m de hauteur le spectre des sujets peuplant la classe [47-58 m [est moins visible. Cette situation est liée à la rareté des arbres d'un calibre supérieur à 47 m de hauteur. L'observation des mangroves ayant plus 47 m de hauteur relève d'un cas isolé dans l'Agouma.

Carte 17 : Hauteurs obtenues par télédétection à partir du LiDAR ; transect d'Agouma



Histogramme 8 : Distribution des hauteurs obtenues par LiDAR à Agouma



Réalisation : Igor Akendengué Aken 2020. Données : Afrisar/NASA/ESA/DLR/AGEOS.,2016

2. Indices de végétation et biomasse

2.1. Indices de végétation

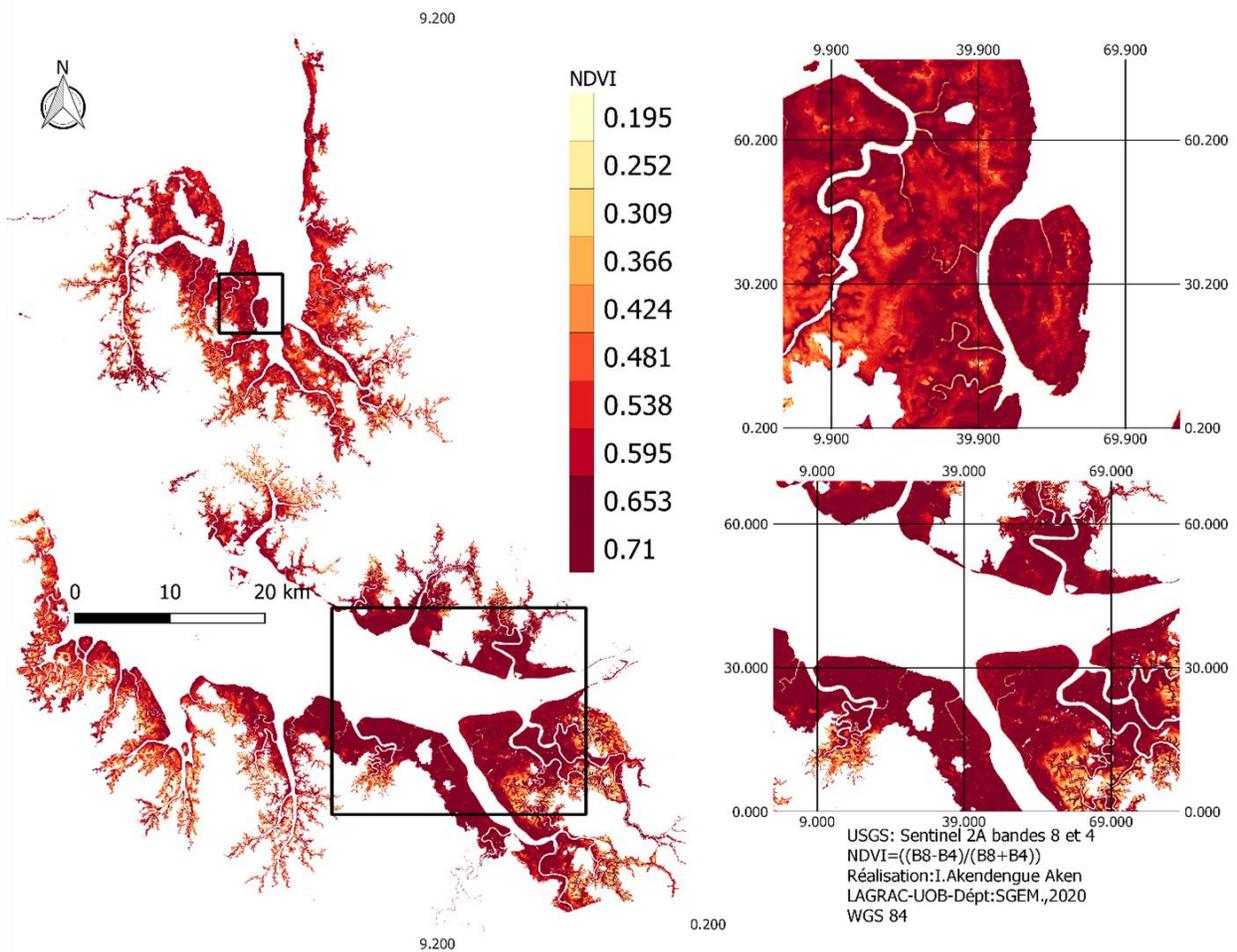
En télédétection optique les indices de végétation simple sont élaborés à partir des opérations arithmétiques entre deux bandes spectrales : le proche infrarouge et la bande visible (rouge). De

ce fait, ils reposent sur la quantité de rayonnement réfléchi par les longueurs d'onde proche infrarouge ou par les longueurs d'onde du visible (rouge). Selon les cas, l'indice de végétation adopte une certaine teinte. Ainsi, si le rayonnement électromagnétique est très élevé dans l'onde proche infrarouge que dans l'onde visible (rouge). C'est la raison pour laquelle les indices de végétation ont été choisis comme indicateur de biomasse.

- Indice normalisé de végétation (NDVI)

Un NDVI positif traduit la présence de végétation. Par contre s'il est plus chargé dans l'onde rouge que dans le proche infrarouge le NDVI est négatif. Cela traduit un tout autre milieu que de la végétation (sol nu, rocheux ou végétation inondée). Fort de ce principe, le NDVI est utilisé comme indicateur de biomasse. Toutefois, il a l'inconvénient de ne tenir compte que de la réflectance de la canopée, sans prendre en compte la structure verticale de la végétation. Cela revient à dire que, même dans une forêt dense avec des individus de gros diamètres (DBH) et de hauteur de plus 30 m de hauteur avec des feuilles fanées, le NDVI indiquerait un faible taux de biomasse ; étant donné qu'il se base sur la réflectance des feuilles. De ce fait, le NDVI des mangroves dans les estuaires au Gabon varie entre 0,20 et 0,71. Le constat est que les zones, qui ont été identifiées comme ayant les plus hautes mangroves, sont les mêmes qui ont les plus fortes valeurs de NDVI. Ainsi, la Remboué, Donguila et Maga sont comprises entre 0,65 et 0,71 de NDVI. Alénakiri, Soukou doukou sont compris entre 0,53 et 0,59 (Carte 18, ci-après).

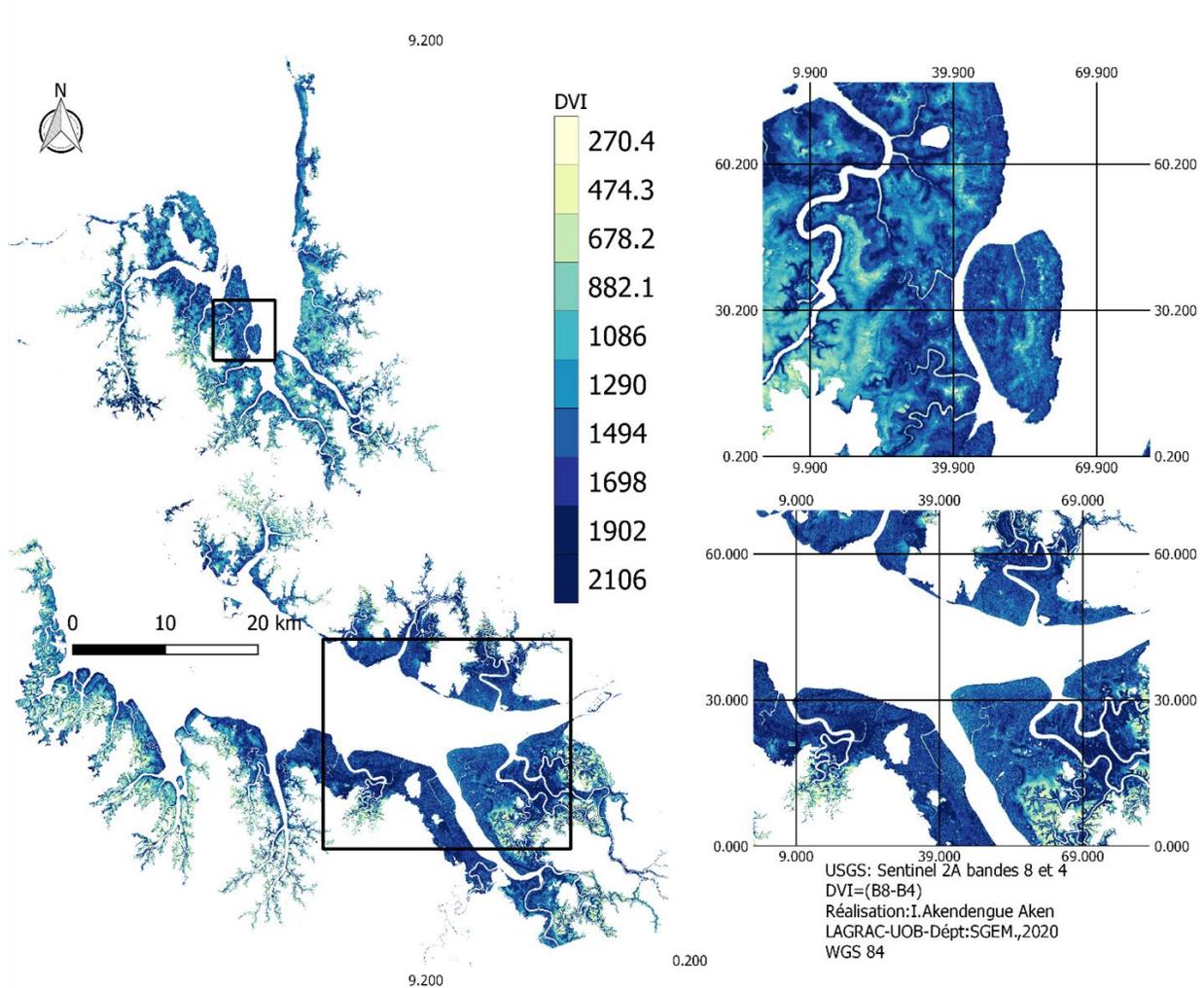
Carte 18 : NDVI des mangroves estuariennes au Gabon



- Indice de végétation différentielle (DVI)

L'indice de végétation différentielle traduit la différence du taux d'absorption entre la longueur d'onde électromagnétique proche infrarouge et la longueur d'onde électromagnétique rouge. Elle a l'inconvénient d'être influencé par les sols et l'atmosphère. Ainsi, dans une forêt dense la longueur d'onde électromagnétique rouge sera très faible et cela entraînera une saturation du DVI. A cet effet, le DVI des mangroves des estuaires au Gabon est compris entre 270 et 2106 (Carte 19, ci-dessous).

Carte 19 : DVI des mangroves estuariennes au Gabon

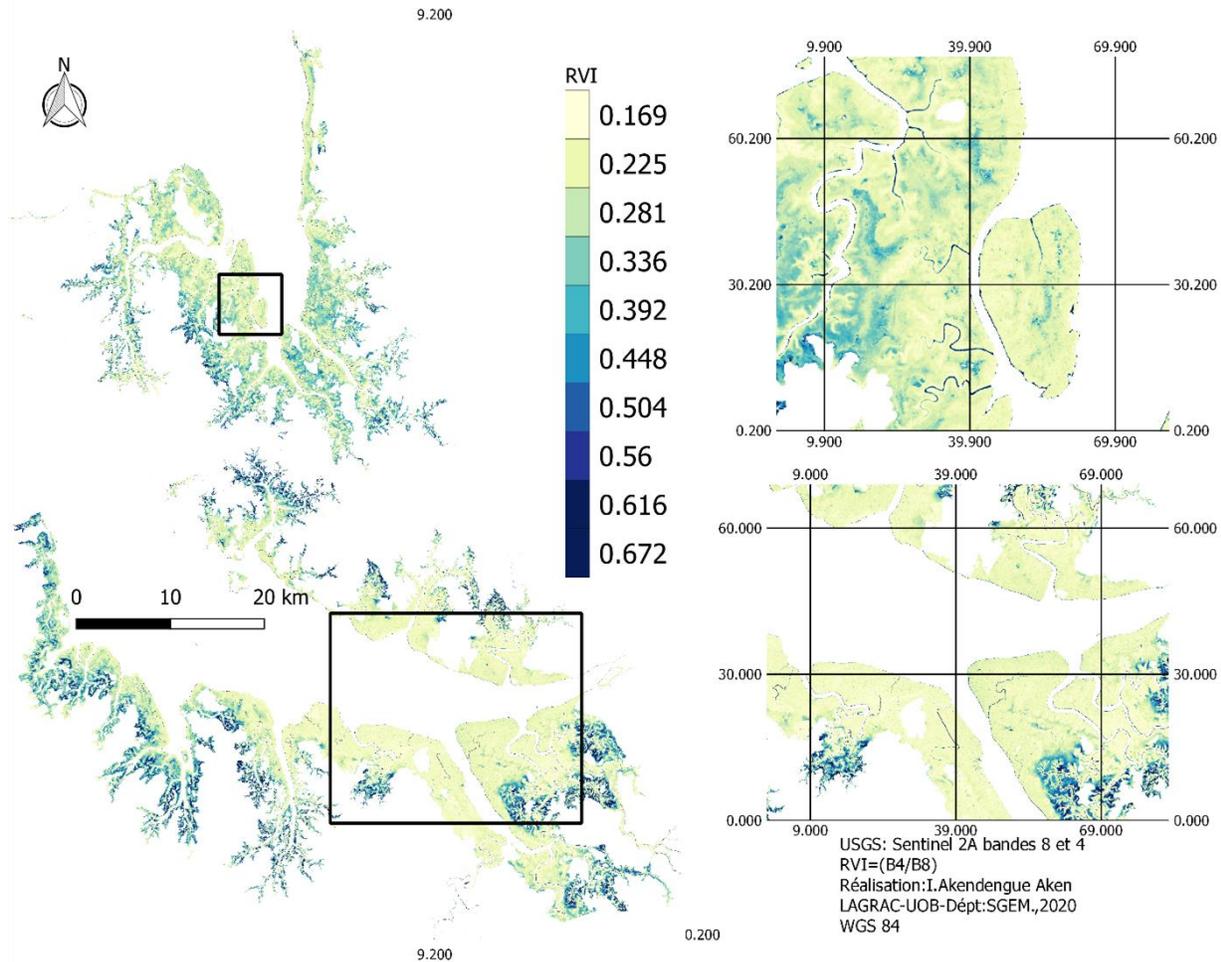


- Indice de végétation par quotient (RVI)

L'indice de végétation par quotient (RVI en anglais), se traduit par un rapport entre la bande spectrale électromagnétique du proche infrarouge et de la bande électromagnétique du visible (rouge). Il représente croisement entre la pente de la droite à l'origine (0,0) et la coordonnée de végétation dans un espace spectral réduit de deux dimensions. Cet indice est borné à 0 et ouvert à plus l'infini $[0, +\infty [$. Ainsi, le sol génère des valeurs proches ou supérieures à 1. L'eau par contre qui a une plus forte réflectance dans le visible aura une valeur inférieure à 1. Tout comme le DVI, le RVI a l'inconvénient d'être influencé par les sols et l'atmosphère. Ainsi, dans une forêt dense la longueur d'onde électromagnétique rouge sera très faible et cela entraînera une saturation du

RVI. A cet effet, le dvi des mangroves des estuaires au Gabon est compris entre 0,16 et 0,67 (Carte 20, ci-après).

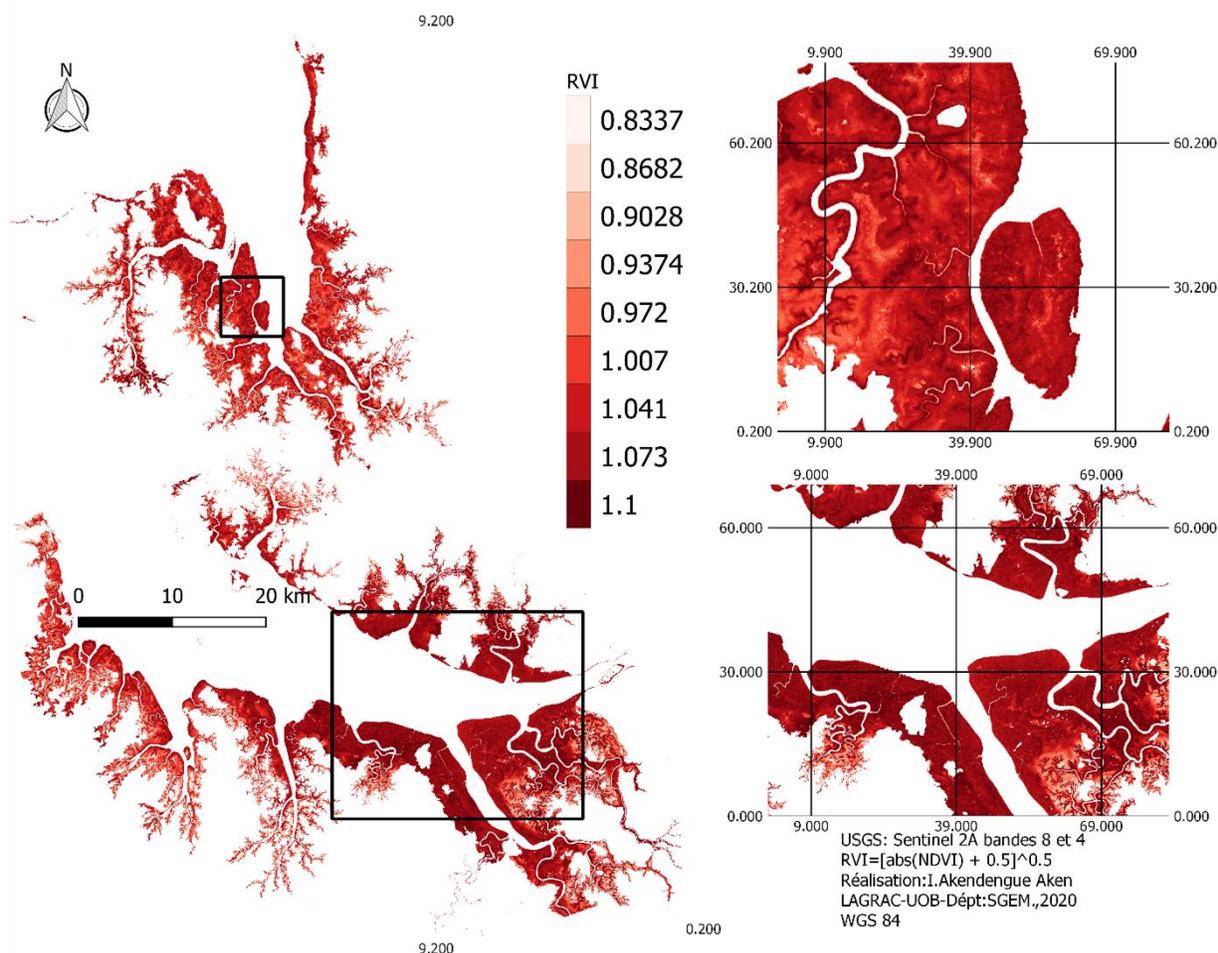
Carte 20 : RVI des mangroves estuariennes au Gabon



- Indice de végétation par quotient amélioré (RVI)

Compte tenu des perturbations de RVI due à l'influence du sol et de l'atmosphère, L'algorithme du RVI a été amélioré par Rouse et *al.* (1973). Celle-ci se traduit par une valeur absolue de l'indice normalisé de végétation (NDVI) auquel une constante de 0,5 est ajoutée. Ensuite le tout est élevé à la puissance de la même constante. Cela se traduit comme suit : $RVI = [abs(NDVI) + 0,5]^{0,5}$. Ainsi le RVI des mangroves est désormais compris entre 0,83 et 1,1 en lieu et place de 0,16 et 0,67 (Carte 21, ci-après).

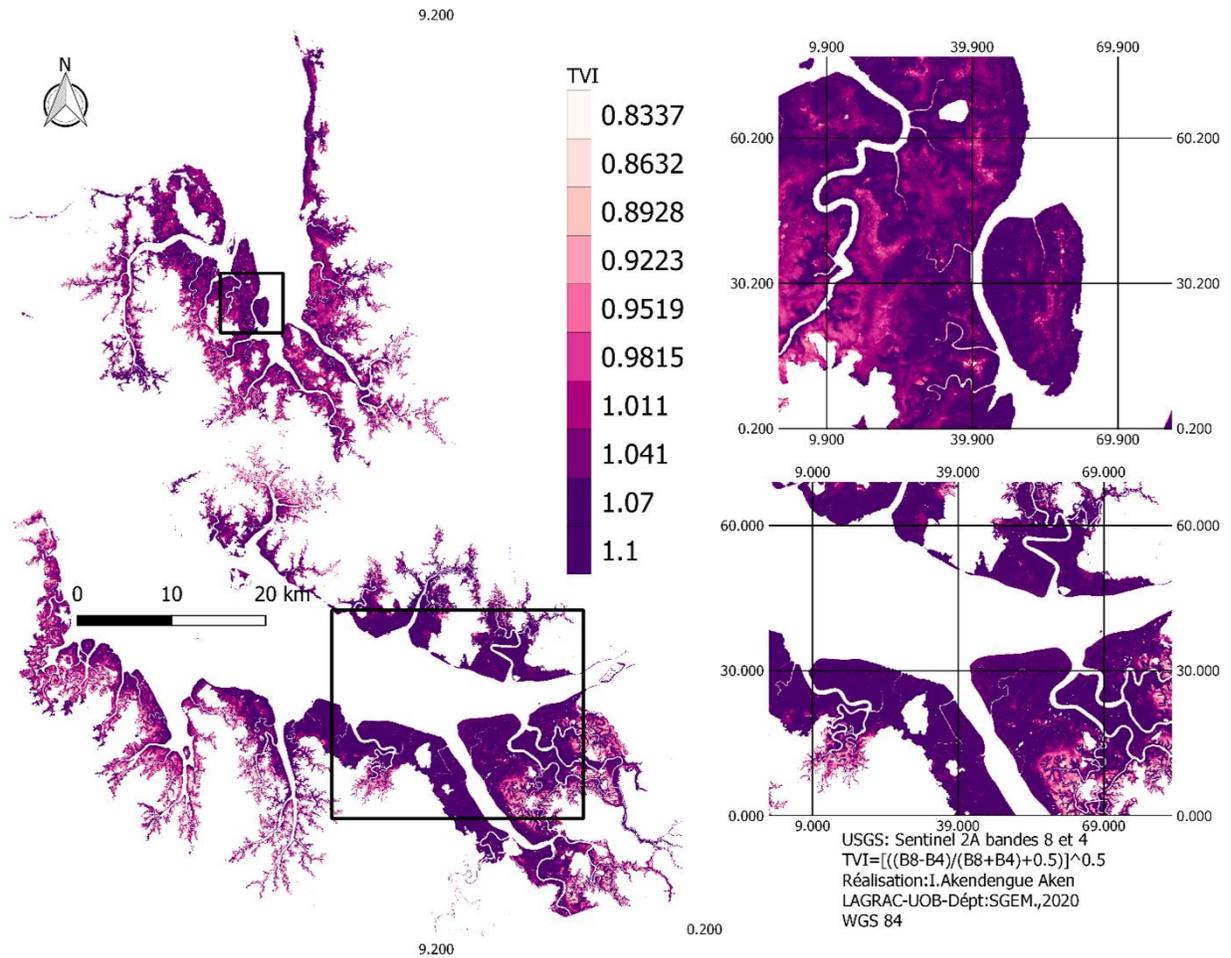
Carte 21 : RVI amélioré des mangroves estuariennes au Gabon



- Indice Triangulaire de Végétation (TVI)

L'indice de triangulaire de végétation (TVI) a été mis en place par Rouse et *al.* (1973), pour compenser la présence de valeur négative dans le NDVI qui n'aide pas dans le traitement statistique. Ainsi, la présence de l'eau, de sol nu et roché est inhibée. Dans notre cas le NDVI des mangroves ne contient pas des valeurs négatives. Cette indice a été préconisé dans le cas où la mangrove peu dense aux individus espacés les uns des autres observés sur le terrain auraient des incidences sur le NDVI. Ainsi, le TVI des mangroves estuariennes est compris entre 0,83 et 1,1. Les zones de forte teinte de NDVI correspondent aux zones de forte teinte de TVI. Ainsi, la partie méridionale Remboué et Maga à forte densité de mangrove et de mangrove haute enregistrent les fortes valeurs de NDVI et de TVI (Carte 22, ci-après).

Carte 22 : TVI des mangroves estuariennes au Gabon

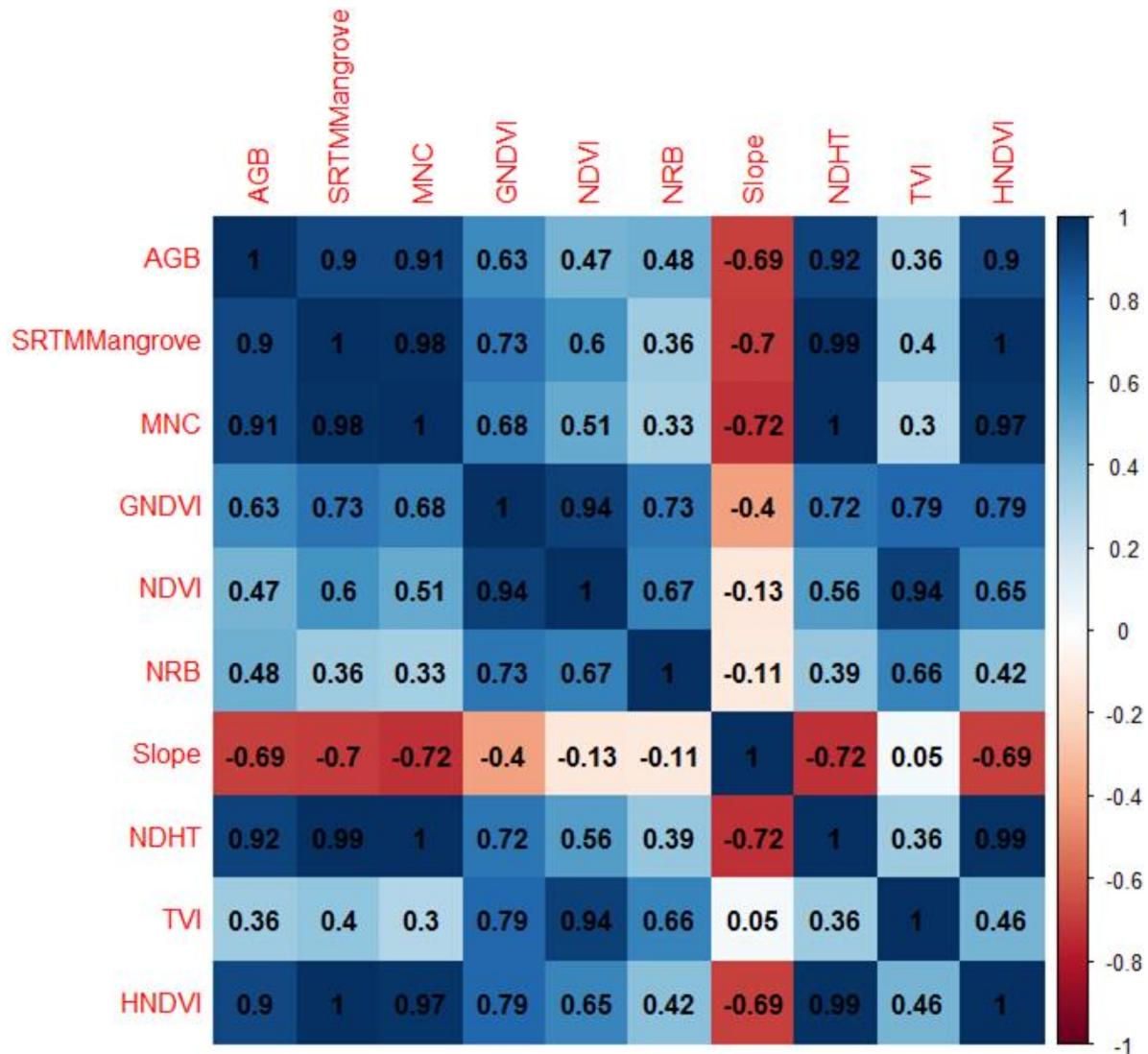


3. Diagnostic de relation indice de végétation, SRTM et biomasse

Il y a lieu de souligner que le coefficient de corrélation varie entre [-1 et 1]. Le premier traduit corrélation négative parfaite ; tandis que le second indique corrélation positive parfaite. Alors, le coefficient 0,9 entre AGB et SRTM mangrove manifeste un lien fort qui implique une augmentation de l'AGB quand le SRTM mangrove augmente. À l'inverse, la variable pente (slope) négativement corrélée à l'AGB avec -0,69 de coefficient implique une diminution de l'AGB quand la pente augmente. D'une manière générale, le corrélogramme matriciel indique que les variables SRTM, MNC, GNDVI, NDTH et HNDVI sont positivement corrélés à l'AGB avec des coefficients > à 60 et la variable pente (slope) est négativement corrélée à -0,69 de coefficient. Par ailleurs, les variables NDVI, NRB et TVI ont pour coefficient respectif 0,47 ; 0,48 et 0,36. Leur

lien avec la variable AGB est faible, il est peu probable qu'elles puissent avoir un taux de prédiction de l'AGB qui soit ≥ 50 (Figure 43, ci-après). De manière générale, il ressort que seuls les indices impliquant le SRTM auquel dérive MNC, NDHT et HNDVI sont corrélés à $\pm 90\%$ à la biomasse (AGB). En cela, le SRTM et la hauteur sont retenus comme variables à tester dans l'estimation de la biomasse aérienne dans les mangroves.

Figure 42: Corrélogramme entre les potentiels prédicteurs par télédétection et l'AGB



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Il ressort que les variables associées au SRTM sont fortement corrélées à la biomasse. Il s'agit notamment HNDVI à 90 %, du SRTM à 90 %, MNC 91 % du NDHT à 92 %. Tous les indices classiques de végétation n'ont pas donnés de résultats satisfaisant. Ce constat a porté à

nos réflexions sur l'élaboration d'un modèle à partir du SRTM. Ainsi, nous sommes parvenus à l'ajustement de trois modèles de prédiction de hauteur à partir du SRTM partant du principe que la biomasse est également prédite à partir de la hauteur (Seanger et *al.* 1993 ; Fatoyinbo et *al.* 2013). Il s'agit des modèles : $H = 2,51 * e^{0,068 * SRTM}$, $H = 0,74 * SRTM$ et $H = SRTM^{0,9095}$ auquel nous avons comparés les prédictions avec le modèle $H = 1,07 * SRTM + 1,70$ (Fatoyinbo et *al.* 2013).

4. Biomasse aérienne des mangroves à partir de la hauteur

4.1. Équation d'estimation de la biomasse des mangroves

Trois modèles de prédiction de biomasse ont été ajustés à partir de hauteur. Ainsi, le r^2 ajusté enregistré est de 66 % de taux de détermination. Le RST, l'AIC, le RMSE, le biais et le biais en pourcentage sont respectivement de 1,6 ; 63 ; 0,6 ; -0,13 et -0,63. Il ressort que la marge d'erreur est proche de 0. Toutefois le modèle est sur estimateur de l'ordre de 0,32% (Tableau 17, ci-après).

Tableau 17 : Modèle de prédiction de l'AGB à partir de la hauteur et ses paramètres d'appréciation

Equations	n	b	R ²	R ² aj	RST	AIC	RMSE	Biais	Biais(%)
AGB=17.882*H	30	17.882	0,67	0,66	1,6	63	0,16	-0,13	-0,68

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

5. Comparaison de la biomasse de mangrove

Pour comparer les estimations du modèle obtenu avec le modèle pris dans la littérature (Seanger et *al.* 1993 ; Fatoyinbo et *al.*, 2008) 13 sites ont été choisis. Ce choix des 13 a été guidé par le fait que nous connaissions déjà les valeurs de biomasse aérienne (AGB) au sol. Ensuite, la comparaison s'est appuyée sur l'observation des concentrations de l'AGB sur les cartes générées par chaque modèle. Celle-ci s'est basée d'une part sur le maximum et le minimum, et d'autre part sur la concentration moyenne de chaque estimation (Cartes 23 à 34, ci-après).

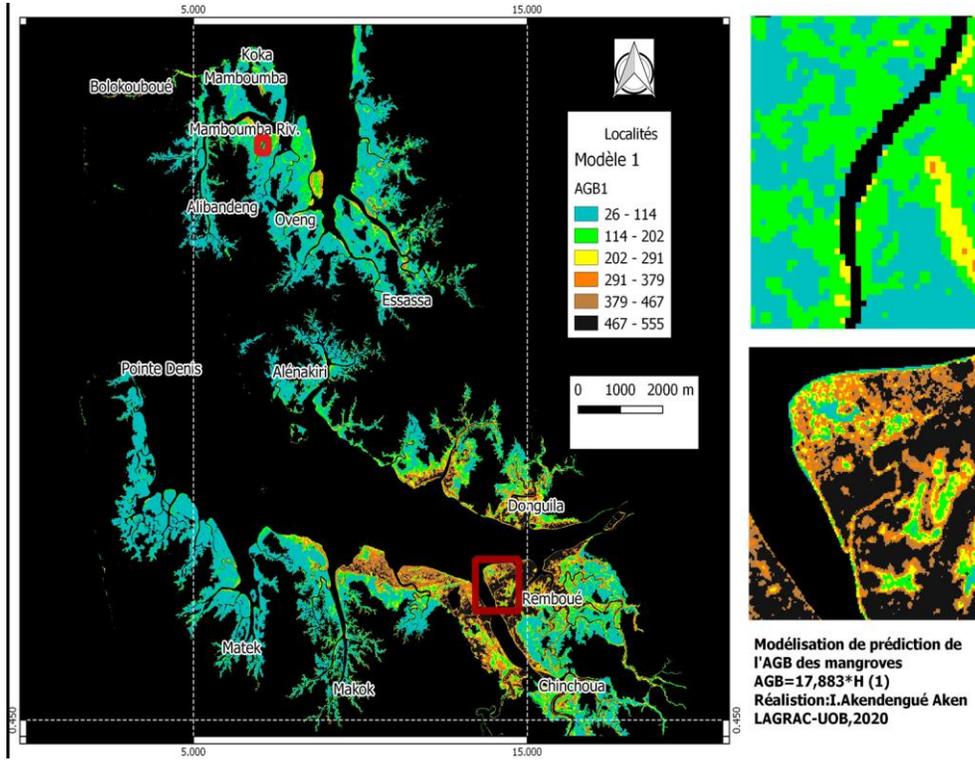
La validation s'est faite en comparant le modèle local avec le modèle pantropical de Saenger et *al.* (1993) calibré dans les mangroves de plusieurs régions du monde et utilisé en télédétection par (Fatoyinbo et *al.* 2008). Le modèle local a un taux d'estimation compris entre 89 t. ha⁻¹ et 858 t. ha⁻¹, tandis que celles du modèle pantropical sont comprises entre 89 t/ha et 553 t. ha⁻¹. La moyenne d'estimations du modèle local est de 406 ± 64 t. ha⁻¹. Les estimations obtenues du modèle pantropical de Saenger et *al.* (1993) sont comprises entre 89 et 553 t/ha avec une moyenne de 280 ± 38 t. ha⁻¹. La différence des estimations du modèle local celles du modèle de Saenger et *al.* (1993) donne une RMSE 153 t. ha⁻¹. Il ressort que le modèle local et le modèle pantropical de Saenger et *al.* 1993 dans l'étude de Fatoyinbo et *al.* 2008 ont un minimum identique de 89 t/ha contre des maximums respectifs de 858 t ha⁻¹ et 553 t ha⁻¹ (Tableau 18, ci-après).

Tableau 18 : Paramètres de statistiques descriptives des prédictions pour l'ensemble des modèles

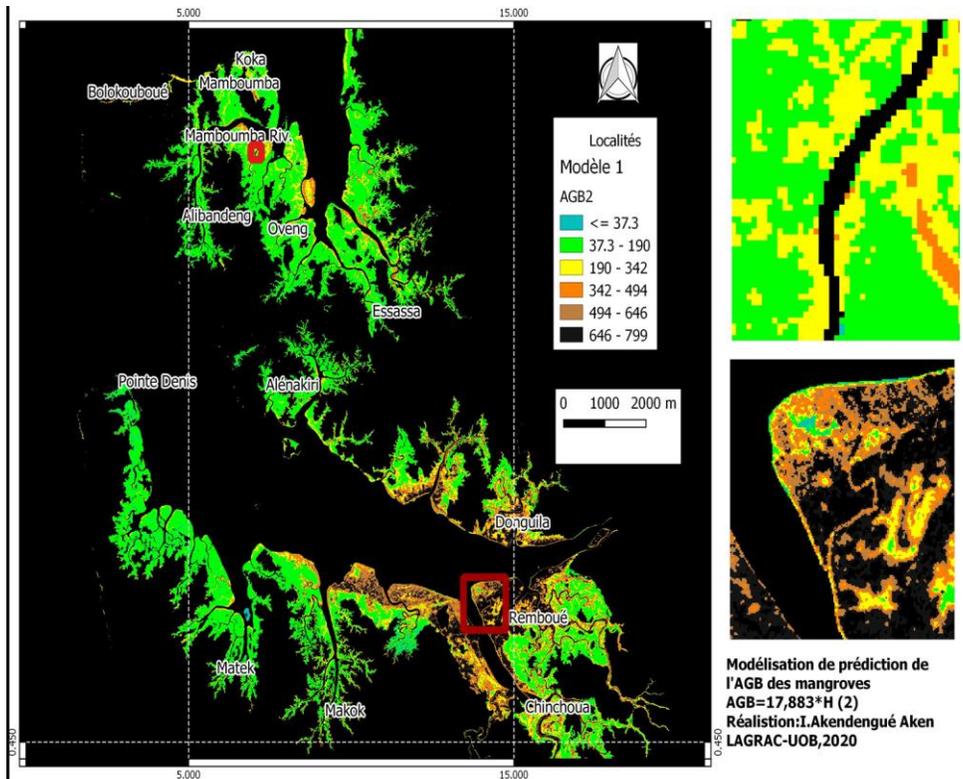
Paramètres	AGB	
	Modèle	Fatoyimbo et <i>al.</i> ,2008
Moyenne	406	280
Erreur-type	64	38
Médiane	358	251
Écart-type	230	139
Variance de l'échantillon	52729	19234
Kurstosis	0	0
Coefficient d'asymétrie	1	1
Plage	769	464
Minimum	89	89
Maximum	858	553
Somme	5275	3641
Nombre d'échantillons	13	13
Maximum(1)	858	553
Minimum(1)	89	89
Niveau de confiance(95.0%)	139	84

Source : Igor Akendengué Aken, 2020.

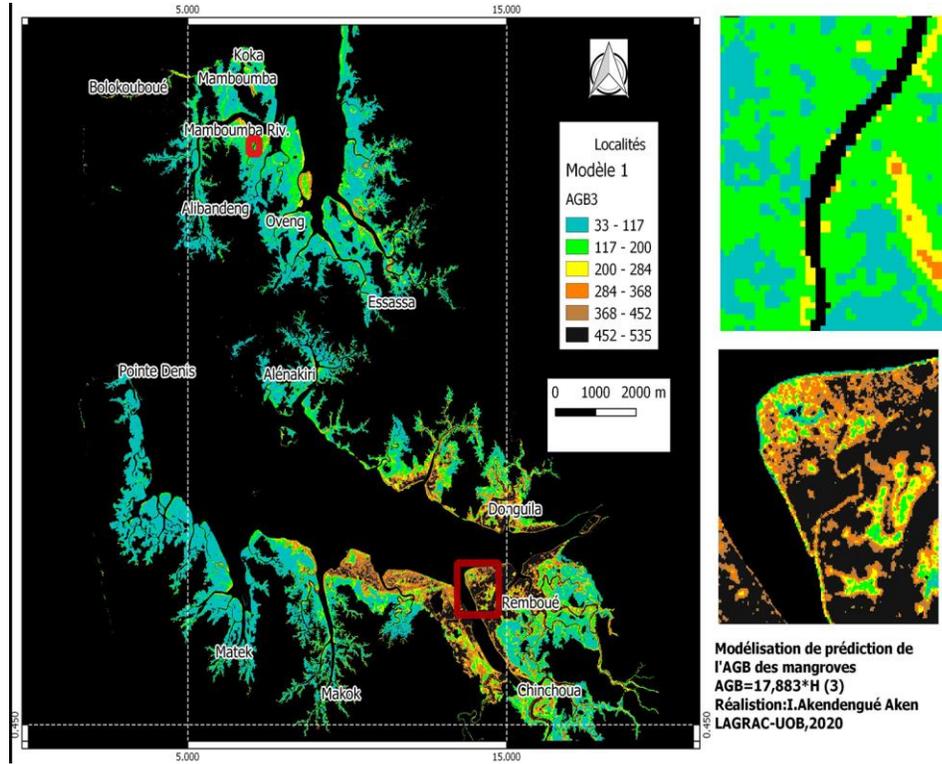
Carte 23 : ABG obtenues par télédétection à partir du modèle 1 hauteur



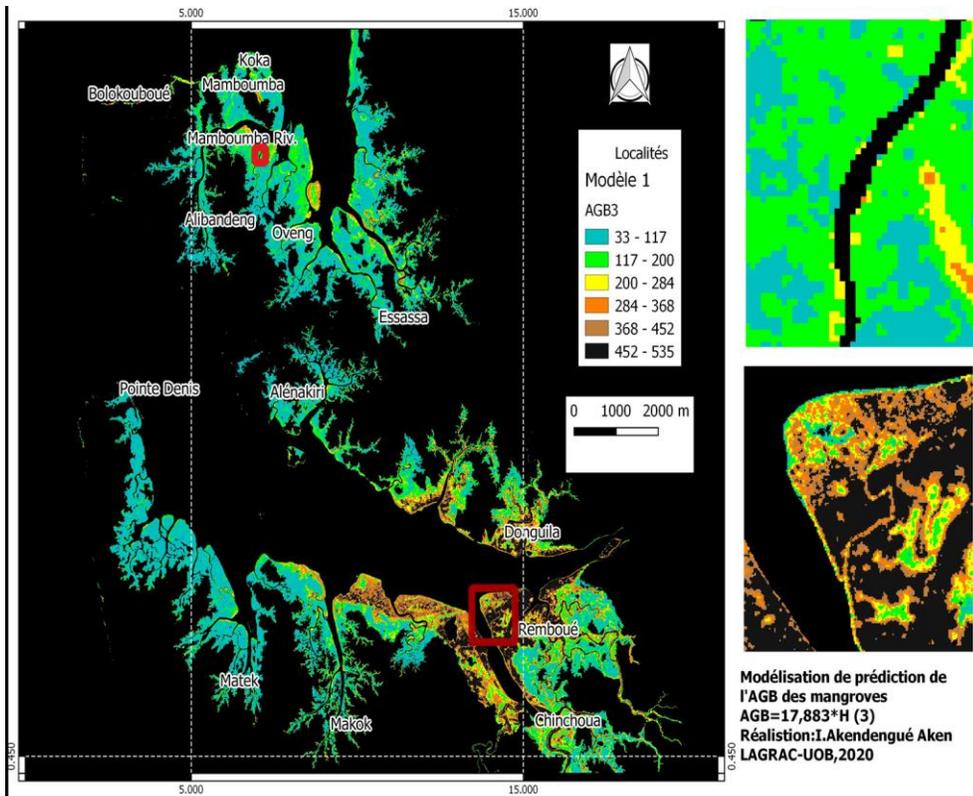
Carte 24 : ABG obtenues par télédétection à partir du modèle 2 hauteur



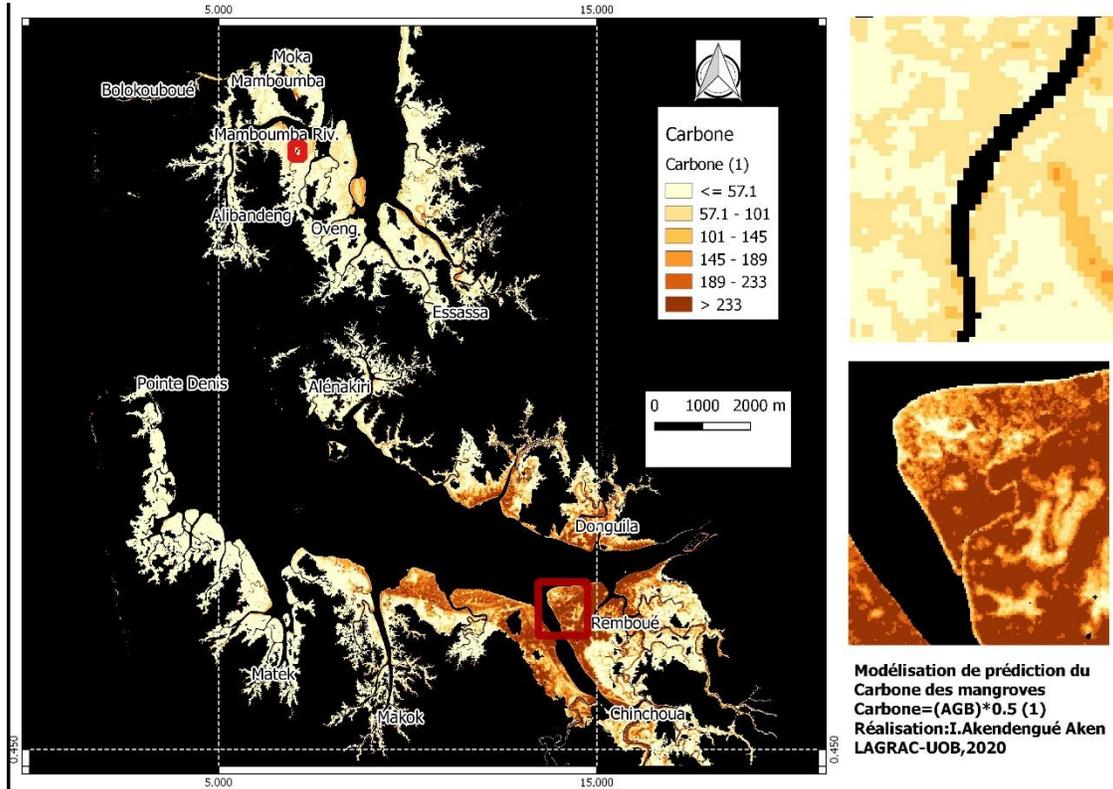
Carte 25 : ABG obtenues par télédétection à partir du modèle 3 hauteur



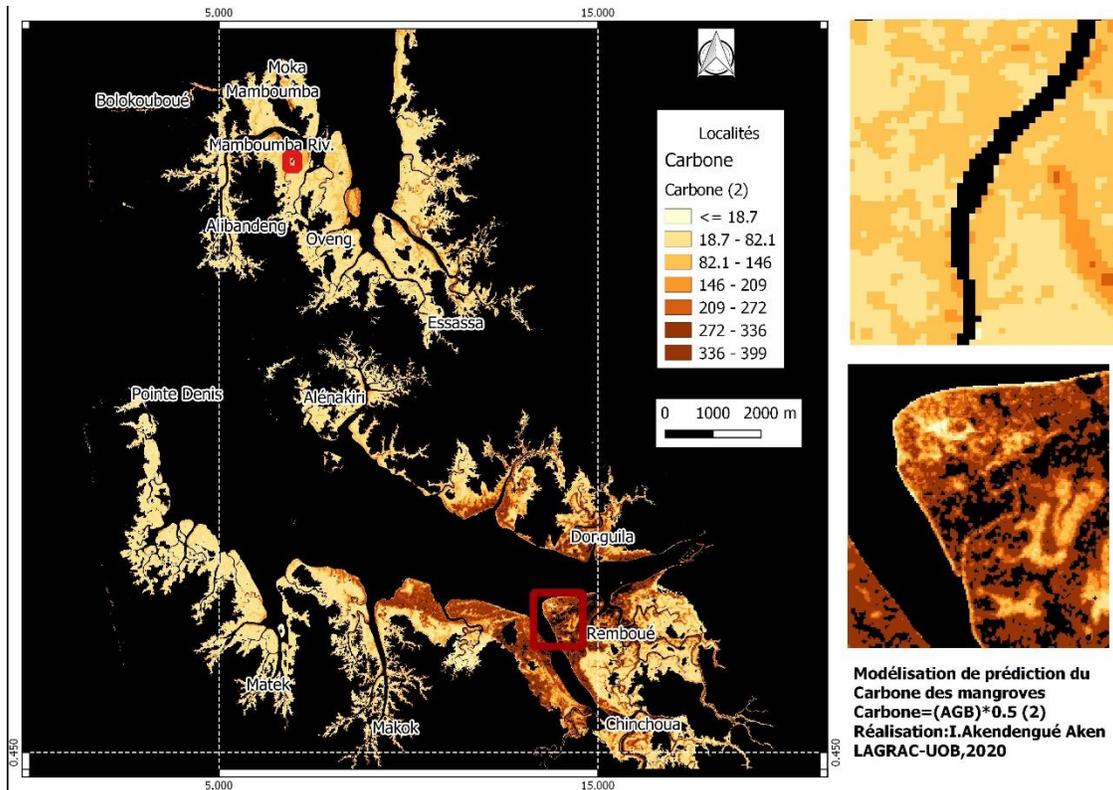
Carte 26 : ABG obtenues par télédétection à partir du modèle 4 hauteur



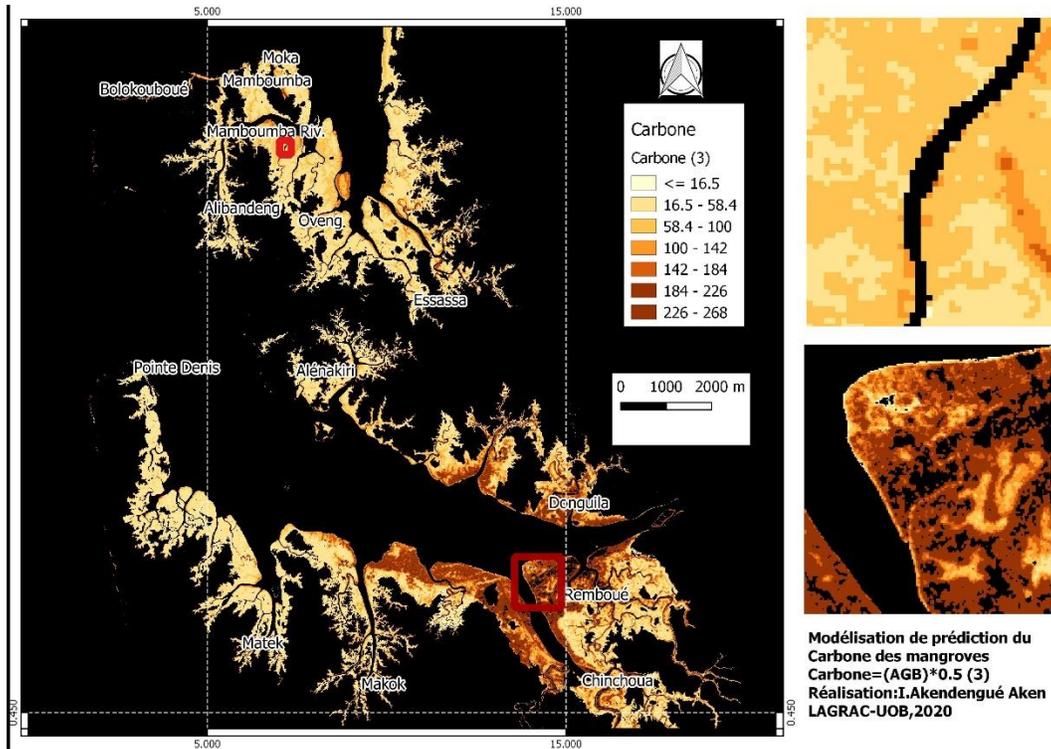
Carte 27 : Carbone obtenu par télédétection à partir du modèle 1 hauteur



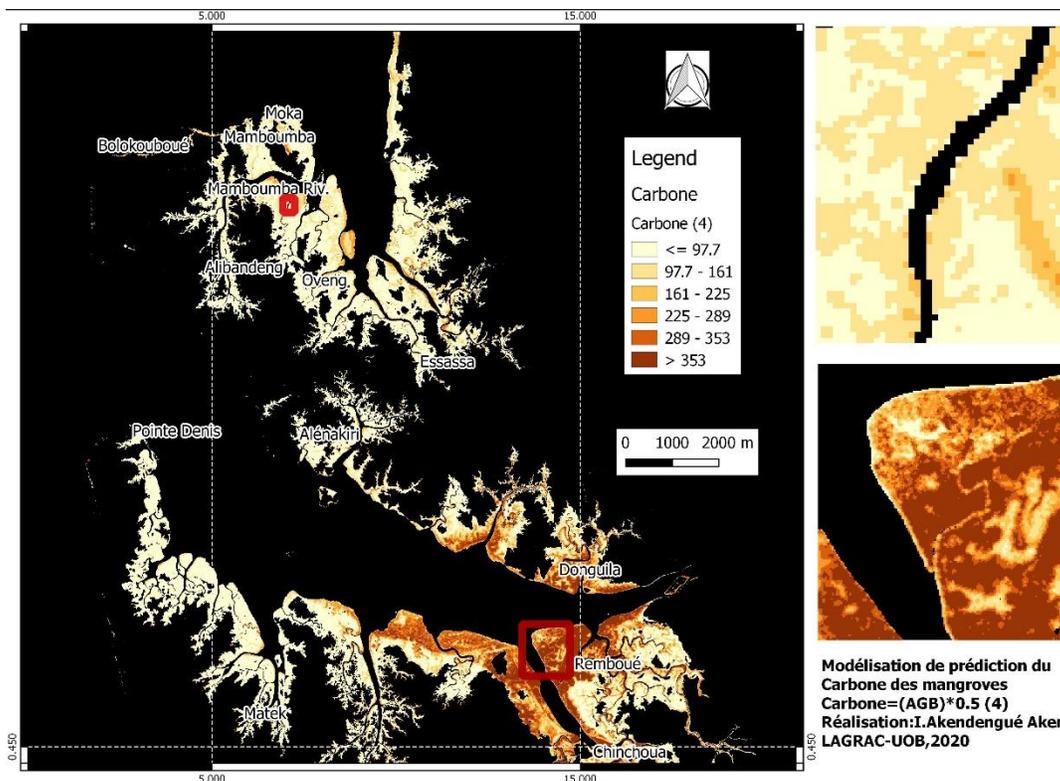
Carte 28 : Carbone obtenu par télédétection à partir du modèle 2 hauteur



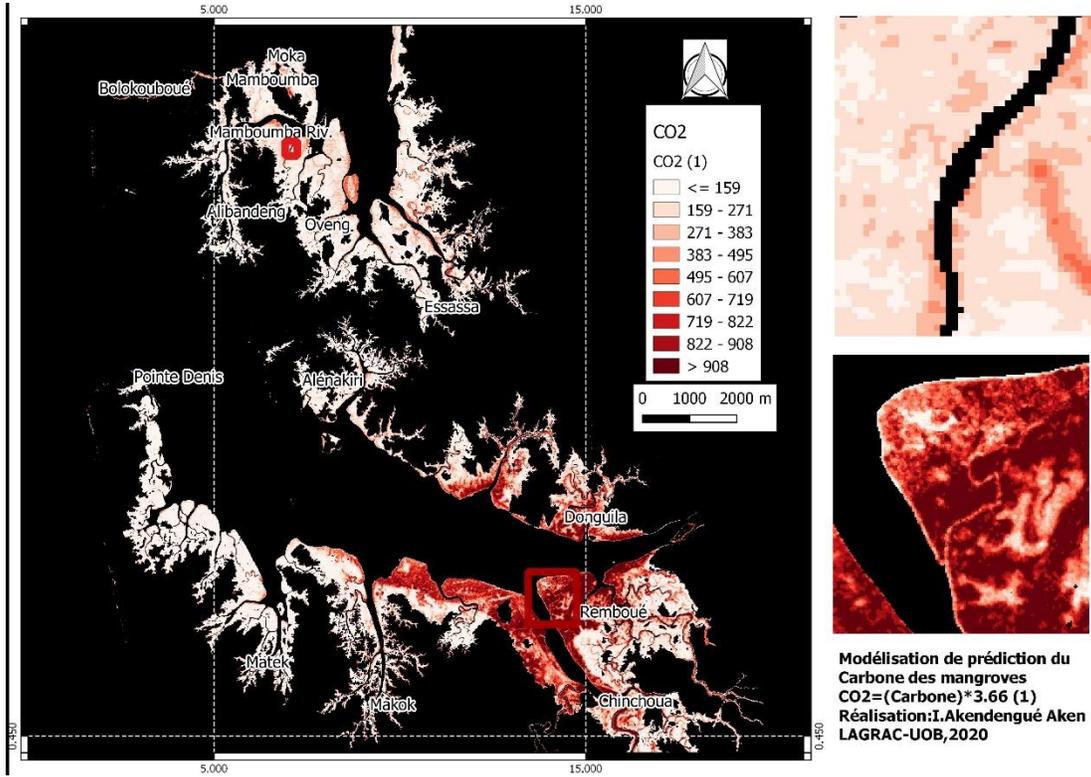
Carte 29 : Carbone obtenu par télédétection à partir du modèle 3 hauteur



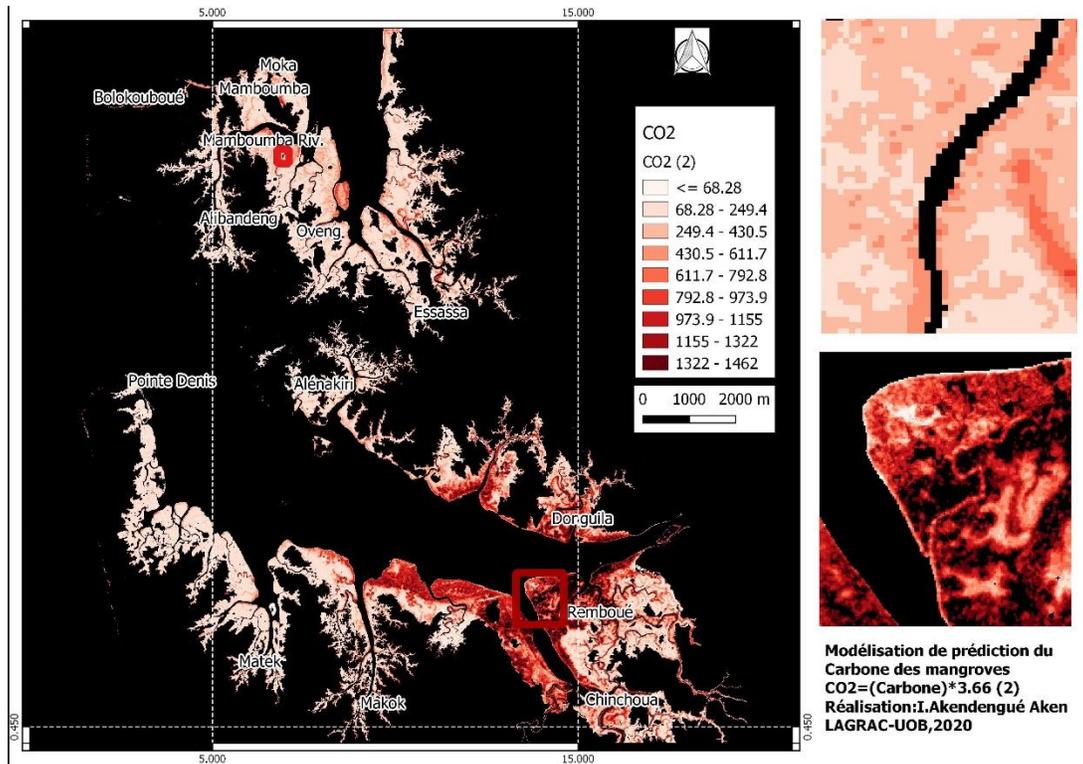
Carte 30 : Carbone obtenu par télédétection à partir du modèle 4 hauteur



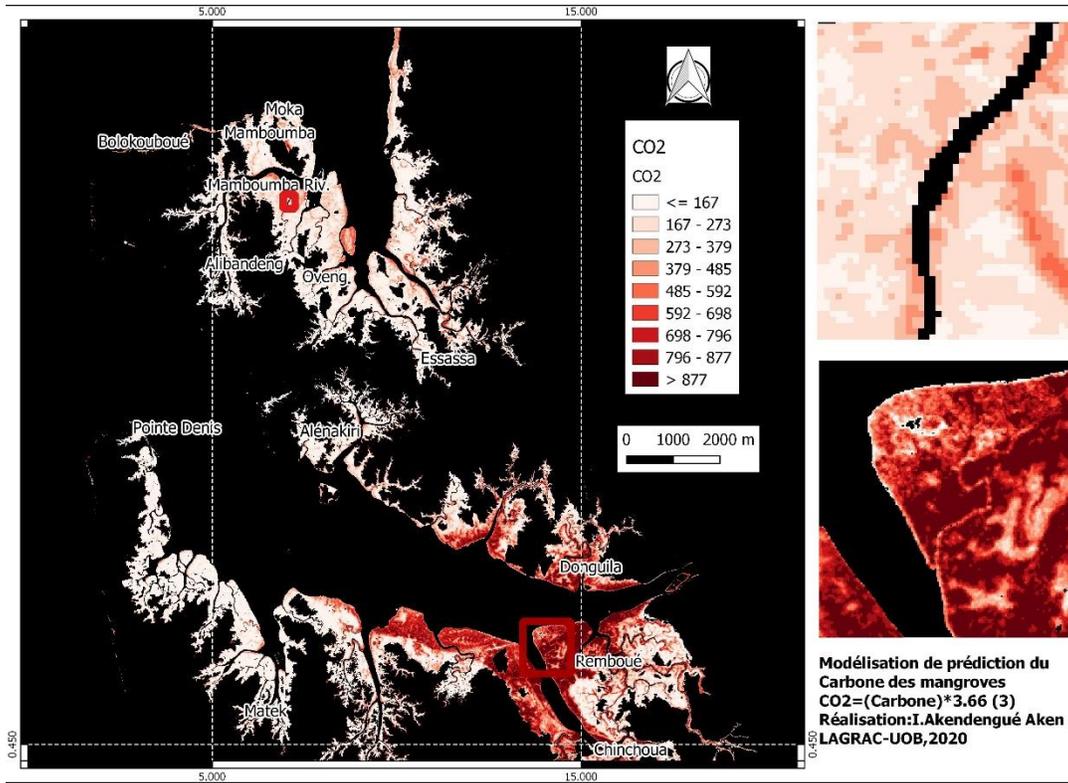
Carte 31 : CO₂ obtenu par télédétection à partir du modèle 1 hauteur



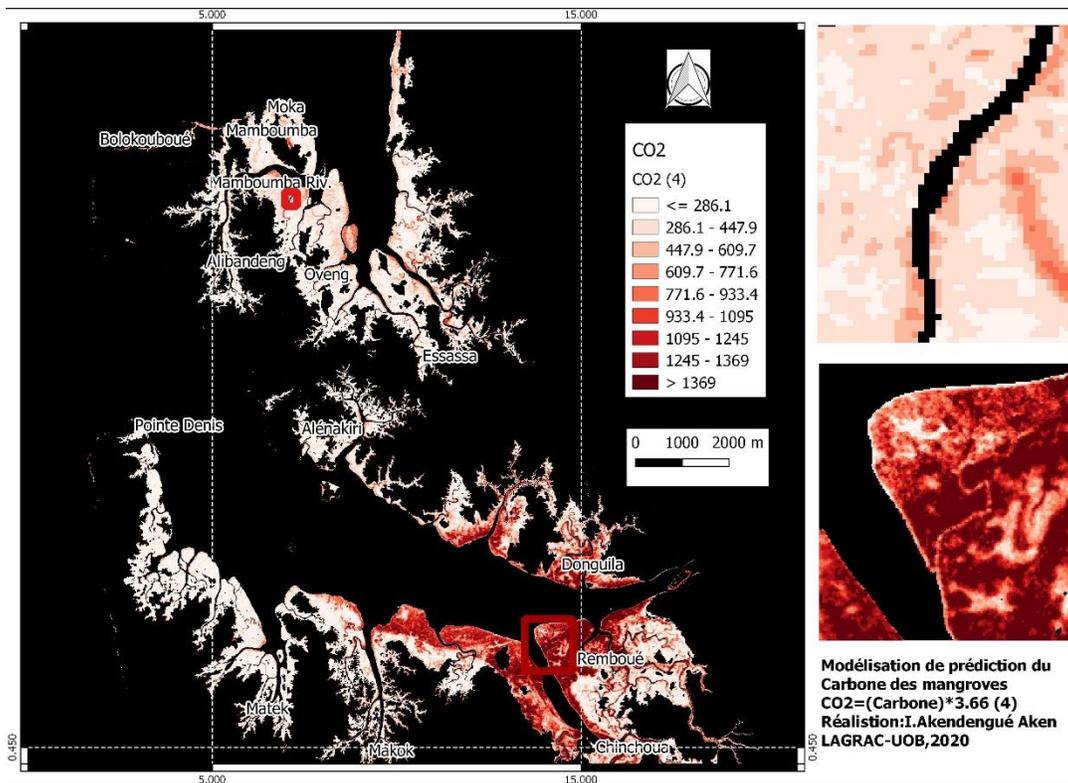
Carte 32 : CO₂ obtenu par télédétection à partir du modèle 2 hauteur



Carte 33 : CO2 obtenu par télédétection à partir du modèle 3 hauteur



Carte 34 : CO2 obtenu par télédétection à partir du modèle 4 hauteur



En définitive, trois équations allométriques de prédiction de hauteur de mangrove à partir du SRTM ont été établies. Elles ont un taux de détermination de hauteur ajustée compris entre 73 et 86 %. Aussi, des indices classiques de végétation ont été évalués, à savoir : NDVI, RVI, TVI, GNDVI ainsi que des indices de végétation couplée à la hauteur du SRTM qui ont été mises en place dans cette étude. Il s'agit du NDTH et le HNDVI.

La matrice de corrélation diagnostique des meilleurs résultats pour les indices associant la hauteur issue du SRTM. Toutefois, l'environnement des mangroves étant partiellement ou totalement submergé, les indices de végétation s'avèrent inopérante d'autant plus que la réflectance de la végétation sera fonction du taux de chlorophylle dans les feuilles qui lui est fonction de la durée de submersion. Donc, une petite mangrove submergée en permanence aura un taux de réflectance élevé. De plus, la réflectance ne traduit pas toujours la capacité de stockage d'un arbre. Ce constat a conduit à s'intéresser uniquement à la variable hauteur pour prédire la biomasse et le carbone par télédétection. Et il a permis d'arriver à la mise en place d'une équation de prédiction de biomasse, carbone et de dioxyde de carbone respectivement de type $y=ax+b$; $y=[(ax+b)*0,5]$ et $y=[((ax+b)*0,5)*3,36]$ ou $AGB=ax+b$; $C=[(AGB)*0,5]$ et $CO_2=[((C)*3,36)]$.

Aussi, il en ressort que certaines régions en sont moins pourvues que d'autres en termes de hauteur et partant de biomasse et de carbone. Ceci oriente les observations facteurs de distribution spatiale des mangroves. Celle-ci passe par les modèles de distribution de DBH des mangroves et par les facteurs de distribution de biomasse et de carbone.

**Partie III : FACTEURS DE DISTRIBUTION SPATIALE
DE LA BIOMASSE ET DU CARBONE DES MANGOVES**

Dans la partie précédente, nous avons montré comment les différents modèles ont été mis en place. Les étapes successives de calibration, de validation et comparaison de modèles ont été suivies pour parvenir aux différentes équations retenues. Les volumes ont été calibrés, ainsi que la biomasse aérienne (AGB) au sol sous la forme non linéaire : $y = \alpha X^\beta$. Par contre, les modèles par télédétection hauteur ou AGB ont été calibrés sous la forme linéaire : $y = \alpha X + \beta$. La télédétection radar s'est avérée plus fiable que la télédétection optique. Autrement dit le SRTM a été plus apte à prédire la biomasse aérienne (AGB), que les indices classiques de végétation.

La distribution spatiale de biomasse et de carbone est fonction des modèles de distribution de DBH et de facteur de détermination spatiale. Les modèles de distribution de DBH permettent d'avoir une répartition spatiale de la distribution des taxons, en fonction du stade de croissance et des intrusions anthropiques. Les modèles de facteur de détermination spatiale, quant à eux sont liés aux conditions du milieu. Ces modèles de facteur de détermination spatiale mettent en exergue la capacité de stockage de biomasse et de carbone des espèces en fonction du gradient environnemental. Ici, les variables environnementales (pH, Salinité, Température, pHmV, Oxygène dissous, Altitude et autres) jouent pleinement leur rôle dans la distribution spatiale des stocks de biomasse et de carbone. La distribution permet de déterminer, d'une part, laquelle de ces variables a une influence prépondérante dans la capacité de stockage de biomasse et de carbone et, d'autre part, lequel de site d'estuaire a le plus de stock de biomasse aérienne (AGB) et, partant, le plus de carbone (AGC).

L'organisation biogéographique de stock de biomasse et de carbone liée au géofaciès et au géohorizon y est également abordé. Il question des variations horizontales, de la crique vers la terre ferme, et des variations verticales. C'est donc un géosystème de mangrove, qui est vu à la fois sous un angle vertical et horizontal. Cela a permis, entre l'arrière mangrove et l'avant mangrove, de découvrir le secteur qui stock le plus de biomasse aérienne (AGB).

Ainsi, le premier chapitre de cette partie traite des modèles de distribution de DBH de façon générale et par site regroupé en estuaire. Ensuite, le deuxième chapitre, quant à lui, fait état des facteurs de distribution. Il aborde la question, d'un part, en tenant compte des variables physico-chimiques et, d'autre part, en prenant en compte l'organisation biogéographique du peuplement.

CHAPITRE V: Modèle de distribution de DBH

Les modèles de distribution sont un élément indispensable dans les études de formation forestière, en ce sens qu'ils permettent de déterminer le statut et le stade de développement taxonomique dans un site. Ils permettent aussi de juger du reboisement, ou de l'entretien ou non d'une formation forestière.

1. Diamètres des mangroves estuariens du Gabon: une singularité

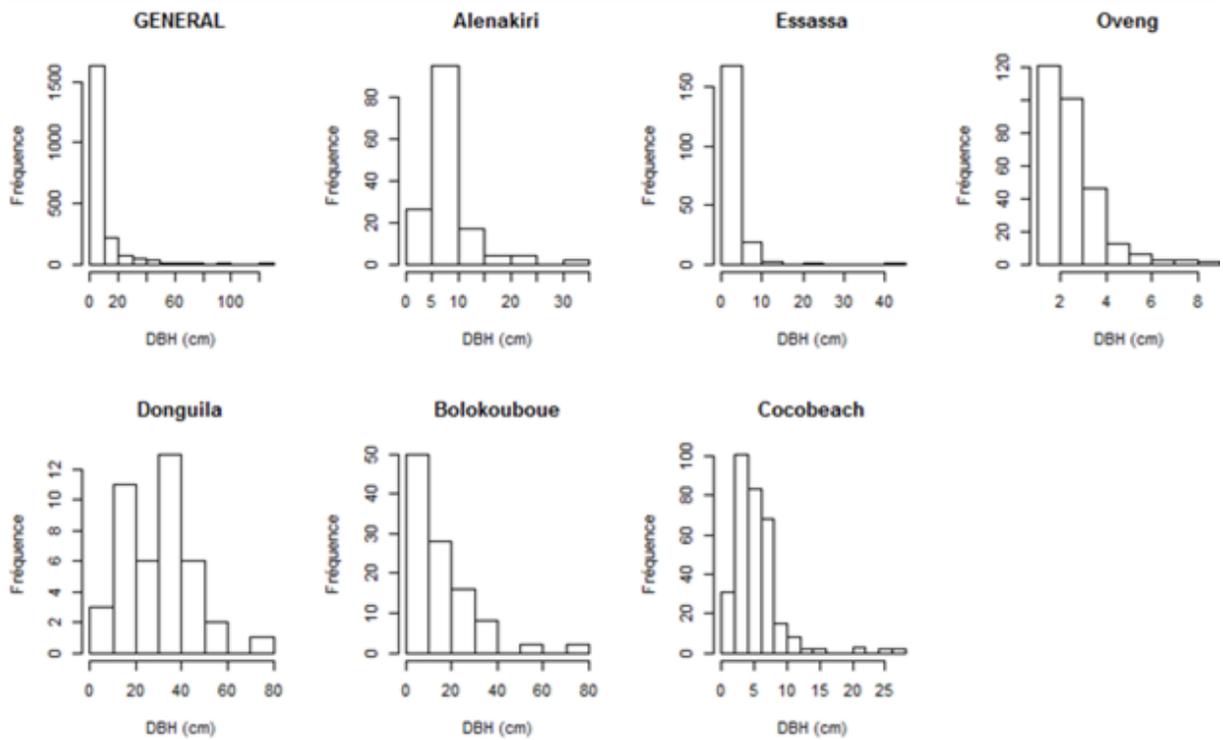
1.1. Synthèse synoptique des principales distributions des DBH

Les calibres de diamètre sont aussi variés que les sites. En effet, d'un site à un autre nous passons d'une courbe en J-renversé simple (Général, Essassa, Oveng et Bolokouboué) en courbe en I (Alénakiri et Cocobeach) et de courbe uniforme (Donguila). Il en est de même des classes de diamètre qui, d'un site à l'autre sont différentes au sein d'une même distribution. Ainsi, par exemple l'ensemble des sites (Général) se caractérise par une courbe en J-renversé avec des classes qui vont de 10 en 10. Tandis que Bolokouboué et Essassa, qui appartiennent aux mêmes types de distribution, ont des classe qui vont de 5 en 5 ; Ce phénomène est également observable au sein de la distribution en I. De ce fait, Cocobeach a une classe de diamètre qui va de 2,5 en 2,5 pendant qu'Alénakiri va de 5 en 5. Cela traduit le fait que ces sites de distribution identique, n'ont pas de pique dans les mêmes classes. Certains sont en mode transitoire vers une courbe en cloche, d'où la différence de classe au sein d'un type de distribution identique. Une analyse plus approfondie du type de distribution par site nous en dira d'avantage.

Le site de Cocobeach a une amplitude comprise entre 12,987 et 655,84 individus par hectare (ind ha^{-1}), soit une moyenne de $251,623 \pm 90,841 \text{ ind ha}^{-1}$. Ce seul site de l'estuaire du Rio Mouni représente un taux moyen de 41,37% d'individu par hectare des trois estuaires. Dans l'estuaire de la Mondah, le site d'Oveng est en tête avec une moyenne de $377,922 \pm 203,563 \text{ ind ha}^{-1}$, et une représentativité globale moyenne de 38,27 % ind ha^{-1} . Il est suivi d'Essassa qui a une moyenne de $137,085 \pm 196,088 \text{ ind ha}^{-1}$. Ensuite, viennent respectivement Mamboumba village et Bolokouboué avec $46,38 \pm 24,91 \text{ ind ha}^{-1}$ et $36,797 \pm 9,961 \text{ ind ha}^{-1}$ de moyenne chacun. Les mangroves

de l'estuaire du Komo sont plus représentatives à Alénakiri, qui enregistre $79,005 \pm 65,656 \text{ ind ha}^{-1}$. Après, viennent celles de Remboué et Donguila avec des moyennes respectives de $44,06 \pm 14,49 \text{ ind ha}^{-1}$ et $14,611 \pm 2,618 \text{ ind ha}^{-1}$. *Grosso modo*, pour l'ensemble des estuaires, la moyenne des individus est de $987,488 \pm 608,133 \text{ ind ha}^{-1}$. L'ensemble des sites remarquables en termes de représentativité sont Cocobeach et Oveng. En effet, ces deux sites à eux seuls ont une représentativité moyenne globale de $79,64\% \text{ ind ha}^{-1}$. Cela s'explique du fait que, dans ces sites, on y trouve plus les petits individus que les gros. Pour preuve, les intervalles de classe de diamètre à Cocobeach et Oveng sont de 1 cm et 2,5 cm (Histogramme 9 et Tableau 19, ci-après). Toutefois, les modèles de distribution théorique ajustée à ces sites sont à déterminer.

Histogramme 9 : Tendence générale de la distribution des DBH par site



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Tableau 19 : Densité de peuplement des mangroves estuariennes du Gabon par site

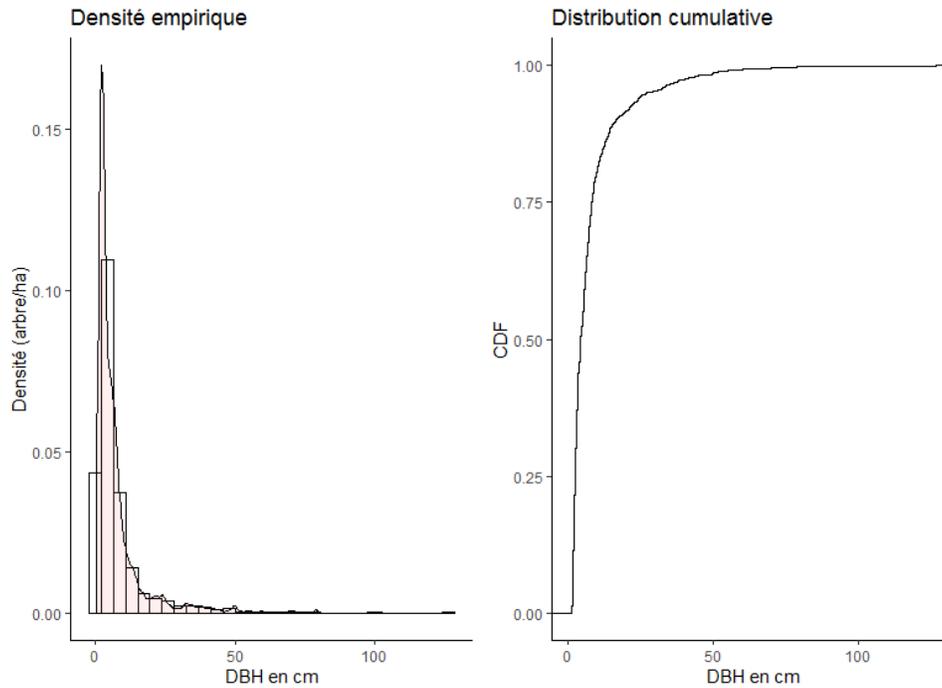
PARAMETRES	min (ha)	max (ha)	médiane (ha)	moyenne (ha)	erreur		skewness	kurtosis	Estuaires
					standard (ha)	sd (ha)			
Cocobeach	12.987	655.84	149.351	251.623	90.841	256.936	0.648	1.519	Rio Muni
Essassa	6.494	785.71	12.987	137.085	196.088	255.101	2.529	9.721	Mondah
Oveng	6.494	954.55	116.883	377.922	203.563	455.180	0.649	0.161	Mondah
Mamboumba Vil.	6.494	337.66	6.494	46.3825	24.916492	93.229	2.790	11.045	Mondah
Bolokouboué	6.494	188.31	19.481	36.797	9.961	42.259	2.984	13.372	Mondah
Remboué	6.494	194.81	22.7275	44.0633	14.490785	54.220	2.023	7.046	Komo
Donguila	6.494	45.455	12.987	14.611	2.618	10.470	2.154	7.822	Komo
Alénakiri	6.494	311.69	22.7275	79.005	65.656	103.335	1.547	4.334	Komo
Total	58.445	3474	363.638	987.488	608.133	1270.731	15.323	55.020	3

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

1.2. Mode de distribution d'ensemble

Les mangroves estuariennes du Gabon présentent des caractéristiques d'une mangrove juvénile en pleine croissance. En effet, selon l'histogramme des probabilités des densités en forme J renversée, donc asymétrique à droite avec un coefficient de Skewness de 3.97, et leptokurtique avec un coefficient de Kurtosis de 25,21. Cela traduit une abondance au niveau des individus à petit diamètre. Naturellement, les arbres de 8 cm de DBH totalisent 12 individus à l'hectare. Et ceux de 12 cm DBH cumulent 8 individus par hectare. La courbe de distribution cumulative amorce son plateau autour de 90 individus par hectare. Ainsi, dans les mangroves estuariennes même en multipliant les échantillonnages, il sera difficile d'avoir une densité supérieure à celle de 90 individus par hectare. Aussi, l'espérance de rencontre d'un individu à DBH plus de 120 est un fait rare de grand effort d'échantillonnage (Histogramme 10, ci-après).

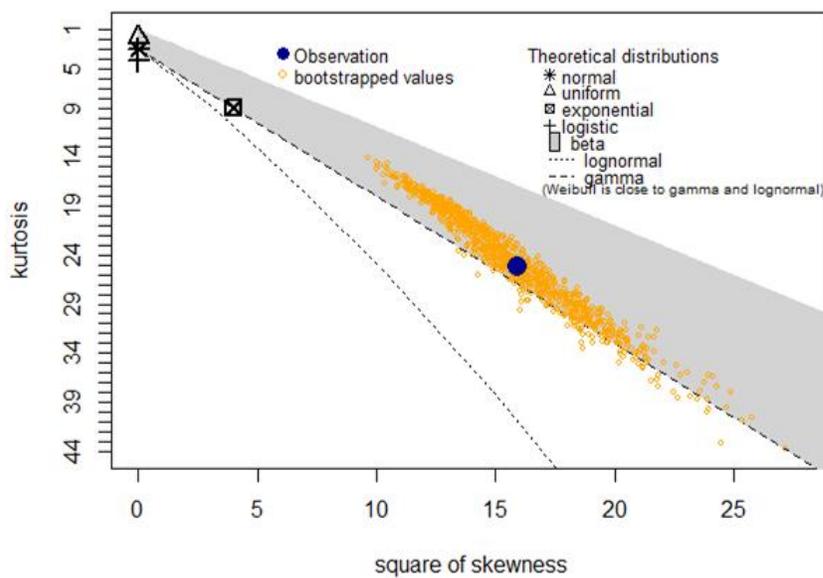
Histogramme 10 : Ajustement du modèle de distribution de DBH des mangroves pour l'ensemble des sites



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Selon le diagnostic du graphique de Cullen et Frey (Figure 44, ci-après), l'ensemble des mangroves des estuaires du Gabon sont proches des modèles de distribution Log-normale, Gamma, Weibull et Exponentielle.

Figure 43: Choix du modèle de distribution pour l'ensemble des sites selon Cullen et Frey

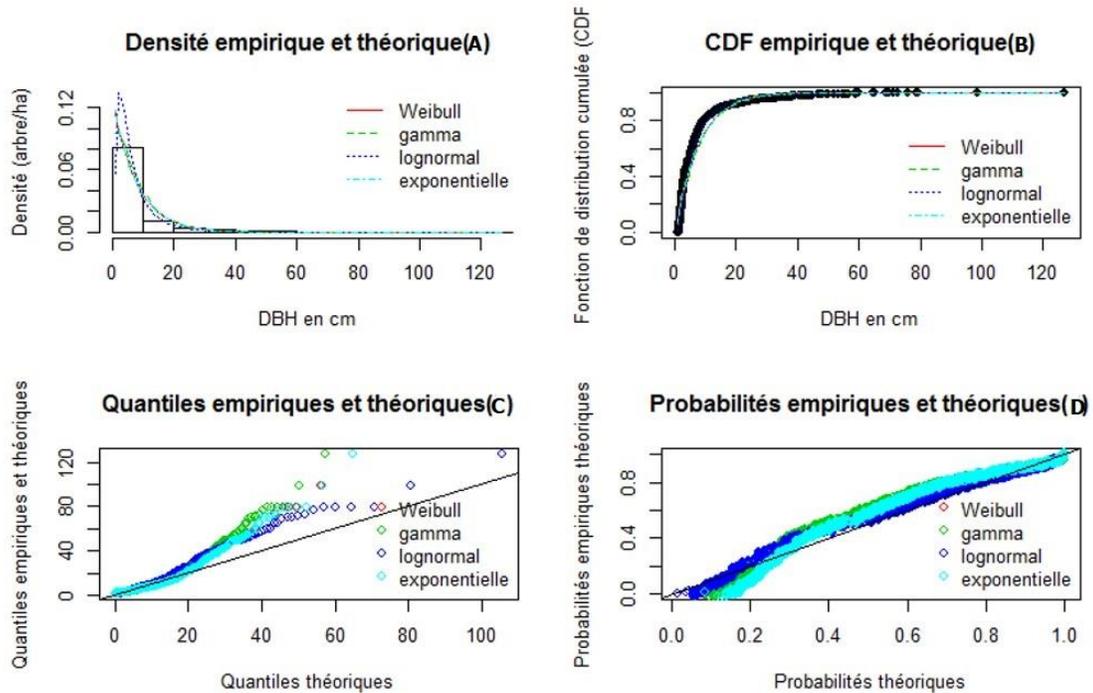


Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Ces familles de distributions sont représentées par des traits en ligne pour Gamma, Log-normale, Weibull et par une surface pour la distribution bêta. Les autres distributions (exponentielle, uniforme, logistique et normale) sont représentées par les symboles delta Δ , astérisque * et signe plus +. Aussi, le point bleu, quant à lui représente les données collectées. Ici l'asymétrie nulle est le reflet d'une présence de symétrie exprimée par la distribution empirique, alors que le poids des queues par rapport à la distribution normale est évalué par le coefficient de Kurtosis. Ainsi, un coefficient Kurtosis égale à 3 indique la normalité (Lana et *al.*, 2013). Dès cet instant, en raison de l'asymétrie positive et d'une valeur de Kurtosis de 25, les distributions Log-normales, Gamma et Weibull sont proposés comme potentielles candidates. Et les points jaunes représentent un échantillonnage aléatoire issu d'un *bootstrap* de 10000 tentatives. Nous constatons que les points jaunes et le point en bleu se superposent. Alors notre échantillonnage de mangrove estuarienne obéit à l'une des familles mentionnées : Log-normale, Gamma, Weibull et Exponentielle.

La qualité de l'ajustement des distributions ajustées est explorée ci-après. Ainsi, la figure 1 du graphique 1 présente le croisement de densité empirique avec celle de densité théorique à partir des potentiels modèles. Les quatre distributions théoriques s'ajustent avec la courbe en point des données empiriques (Figure 2, Graphique 1 ; ci-après). D'après l'examen de la figure 3 des quantiles empiriques et théoriques (Graphique 1), il ressort que l'ensemble de distribution ont des queues bien ajustées à gauche, tandis que du côté droit elles ne le sont pas toutes. Toutefois, la distribution Log-normale se rapproche le mieux de la distribution empirique. La figure 4 (probabilités empiriques et théoriques du graphique1, montre que les quatre modèles s'ajustent au centre avec un décalage aux coordonnées (0,4 : 0,4) de probabilité empirique et probabilité théorique. Ainsi, selon le critère de pénalisation graphique la meilleure distribution est Gamma.

Graphique 1 : Appréciation du modèle de distribution de DBH des mangroves estuariennes



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

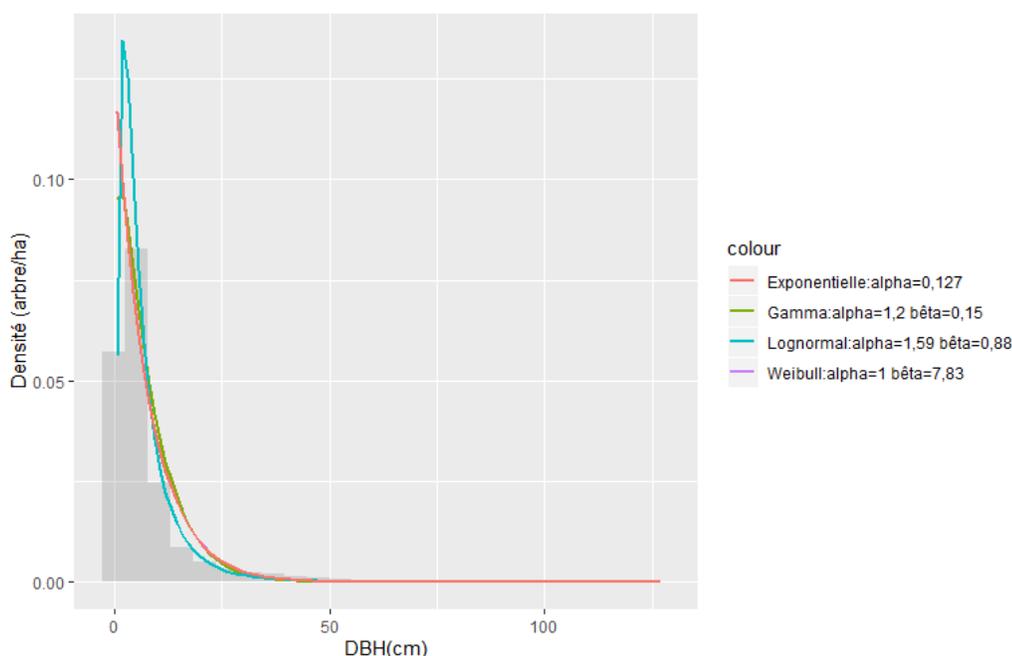
Le critère de pénalité d'information d'Akaike (AIC) distingue le modèle Log-normale comme le mieux approprié aux mangroves estuariennes. En effet, l'AIC de la distribution logarithme népérien (Log-normale) est 11711,9 suivi de la distribution Gamma avec 12378,7, de la distribution exponentielle avec 12420,43 et enfin, de la distribution Weibull avec 12422,4. Cette primauté de la distribution Log-normale est confirmée par les statistiques Kolmogorov, Cramer-Von et Anderson Darling, respectivement de 0,08 , 3,43 et 24,10. Tandis que celles de Gamma, la deuxième meilleure distribution du point de vue de l'AIC, sont chronologiquement de 0,12 , 13,34 et 78,33. Ainsi, la distribution Log-normale a pour coefficient (alpha) $\alpha=1,2$ et (bêta) $\beta=0,15$. D'une manière générale les coefficients α varient entre 0,127 et 1,59 et β entre 0,15 et 7,78. Cette situation explique mieux le chevauchement de courbe des différentes distributions qui, tantôt sont en dessous, ou tantôt au-dessus, les unes aux autres (Tableau 20 et histogramme 11, ci-après).

Tableau 20: Modèle de distribution ajusté pour l'ensemble des sites et leurs critères d'appréciation

Distribution de probabilité	Critère				Critère d'information bayésien (BIC)	α	β
	d'information d'Akaike (AIC)	Kolmogorov-Smirnov	Cramer-von Mises	Anderson-Darling			
Weibull	12422,4	0,15	11,57	75,50	12433,63	1	7,83
Gamma	12378,74	0,12	13,34	78,33	12389,97	1,59	0,88
Lognormal	11711,92	0,08	3,43	24,10	11723,16	1,2	0,15
Exponentielle	12420,43	0,15	11,53	75,47	12426,04	0,127	-

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Histogramme 11 : Allure générale des courbes de distribution pour l'ensemble des sites



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Néanmoins, le fait que α soit compris entre $1 < \alpha < 3,6$ traduit une distribution asymétrique positive, caractéristique des peuplements à prédominance relative d'individus jeunes et à faible diamètre (Glèlè et *al.*, 2016). Toutefois, selon le critère de BIC on observe une migration des DBH de l'ensemble des sites vers une distribution Gamma. Cela est lié au fait que certains sites, comme la Remboue, ont des individus à DBH exceptionnel.

Selon Husch et *al.* (2003) le type Log-normal est un mode de distribution caractéristique de forêts en maturité. Par rapport à la prédominance des petits individus, 80 ind ha⁻¹ ont un DBH

compris entre [1 et 5]. Nous émettons l'hypothèse d'être en présence des mangroves naines, du point de vue de leur mode de distribution. Cette situation d'abondance des mangroves naines au diamètre inférieur à 10 cm, avait été mentionnée par Lebigre (1983) autour de Libreville (Oveng, Lowé, Okala). Cependant, de 1984 à 2020, les diamètres DBH sont toujours similaires. Cela laisse croire que nous sommes face à une forêt de mangrove ayant atteint son climax, d'où la stagnation des diamètres des individus.

Vue que, le diamètre de l'échantillonnage varie entre 0,7 et 127 cm avec une médiane de 4,3 cm, une moyenne de 7,81 cm et un écart-type de 10,56 cm, ainsi qu'un coefficient de Skewness et de Kurtosis de 3,97 et 25,21 ; cela vient à dire que nous sommes en présence d'un faciès de mangrove dominé par l'abondance des individus à petit DBH. Ainsi se justifie la moyenne de 7,81 et la médiane de 4,3 malgré le maximum de 127 cm de DBH. Nous sommes face à une mangrove géographiquement étendue, et dominée par des individus dendrométriquement régressive. Au regard de tout cela, l'hypothèse d'être en présence d'une mangrove naine se vérifie.

Cette structure peut-être due aux conditions du milieu, aux caractères physiologiques des individus ou aux changements environnementaux rapides. En effet, la profondeur moyenne du sol dans les mangroves autour de Libreville est de 90 ± 50 cm. Le pH moyen est de 7, la salinité moyenne quant à elle est à 19 g/l. Mais, pour le moment, nous ne n'avons pas encore assez d'éléments pour nous prononcer sur l'influence des paramètres physico-chimiques environnementaux sur les mangroves. Nous-y reviendrons dans le chapitre 10.

2. Distribution par site

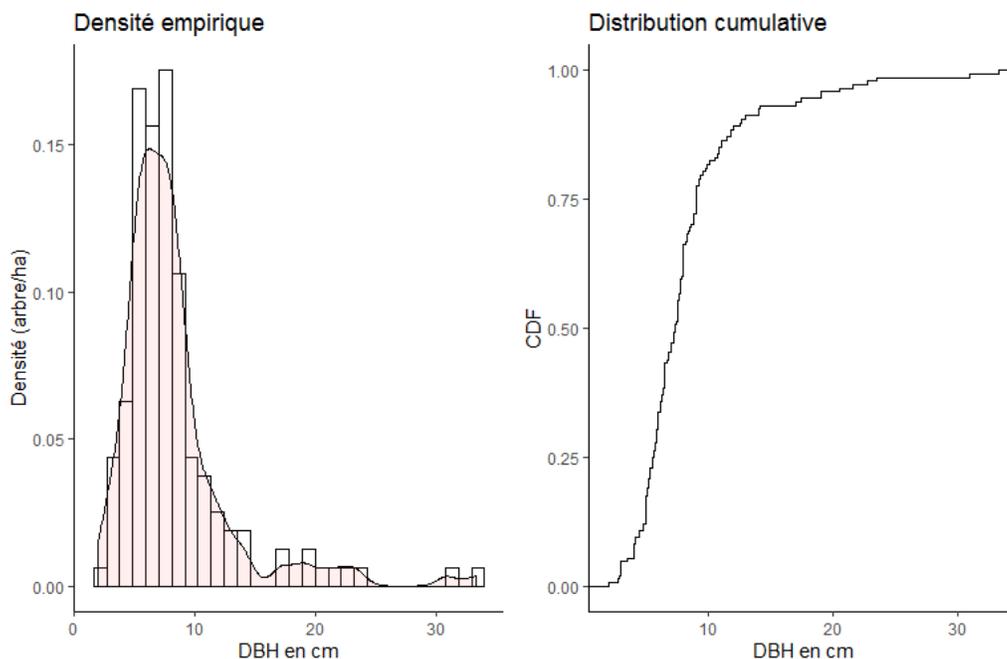
2.1. Estuaire du Komo

2.1.1. Alénakiri

La structure de DBH du peuplement de mangroves, toutes espèces confondues à Alénakiri, varie entre 2 et 33,3 cm avec un DBH, moyen de $8,23 \pm 4,72$ cm. Les fortes densités sont observées au sein des calibres 4, 5 et 6 cm de DBH avec chronologiquement 18, 16 et 19 ind ha⁻¹. Au-delà du calibre de 10 cm de DBH la densité d'arbre par hectare est inférieure à 5 ind ha⁻¹. Le fait que

les plus grandes densités d'individus se situent entre [0-5[, traduit une forme de régénération. Toutefois, la structure est interrompue par le manque d'individu de calibre] 16[et]17[cm de DBH et, aussi, l'absence d'individu entre]25 - 30[et] 32 [cm de DBH. L'observation de plus de 3 ind ha⁻¹ pour un DBH supérieur à 20 cm est un phénomène rare. De plus, la distribution cumulative amorce une courbure prononcée et se stabilise à partir du calibre 10 cm de DBH. Cela renvoie au fait qu'au niveau d'Alénakiri, au-delà du calibre de 10 cm de DBH, le nombre d'arbre régresse à l'hectare. Normalement quand une forêt se régénère rapidement les individus de 0 à 5 cm de DBH sont les plus abondants. Or à Alénakiri est amorcée une migration d'abondance des individus de 0 à 5 cm de DBH vers les individus de 5 à 10 cm de DBH. Par exemple, le calibre 7 cm de DBH a 19 ind ha⁻¹ de même que le calibre de 5 cm DBH a 18 ind ha⁻¹. Toutefois, en cumulant nous obtenons 27 ind ha⁻¹ pour les individus de [0 à 5 [cm de DBH et 51 ind ha⁻¹ pour les individus de calibre de [5 à 10[(Histogramme 12, ci-après). Elle confère à l'histogramme une forme en cloche ; c'est donc un site où le recrutement est faible. Plusieurs hypothèses sont émises pour expliquer ce phénomène. La première est que les jeunes pousses de mangrove meurent avant d'arriver à l'âge adulte. La deuxième pourrait être liée à une variation rapide des conditions environnementales naturelles. La troisième serait plutôt liée à une perturbation anthropique du milieu.

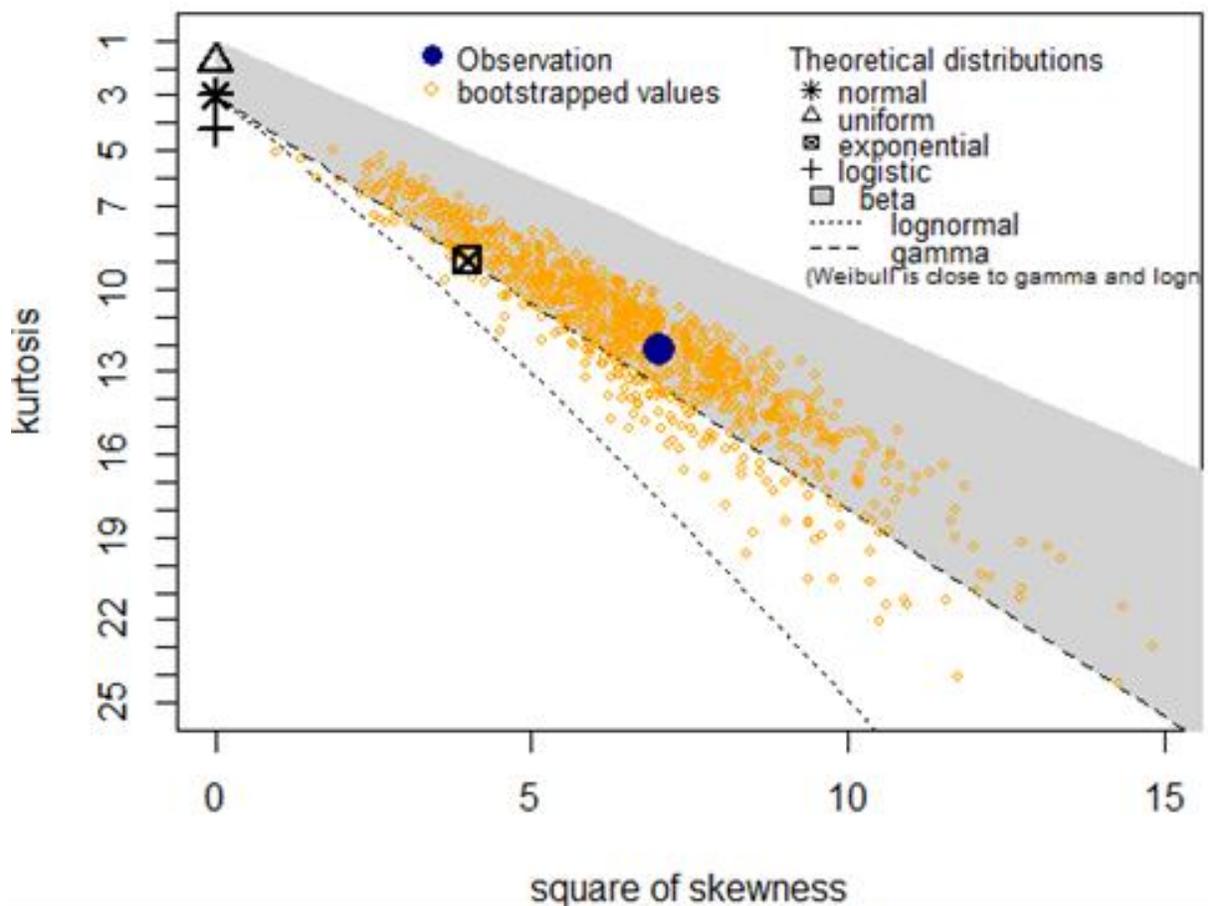
Histogramme 12 : Ajustement du modèle de distribution retenu pour le DBH des mangroves d'Alénakiri des sites



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

L'évaluation graphique présente six distributions classiques. À l'extrême gauche au-dessus figure les distributions normales, uniformes et logistiques avec un coefficient de Skewness de 0, or seule la distribution normale peut prendre une telle valeur. Par ailleurs, la distribution normale enregistre un coefficient de Kurtosis de 3, or le graphique de Cullen et Frey diagnostique un coefficient de Kurtosis de 12,24 qui exprime l'asymétrie à droite. Donc les trois distributions mentionnées auparavant ne sont pas aptes à ajuster la distribution des mangroves d'Alénakiri. Ainsi, les distributions potentielles sont les familles : Exponentielle, Log-normale, Gamma et Weibull (Figure 45, ci-après). Le coefficient de Skewness de 2,64 exprime une symétrie à droite tandis que le coefficient Kurtosis 12,24 traduit une distribution leptokurtique à longue queue. Aussi les points jaunes de l'échantillonnage aléatoire issu d'un bootstrap de 10000 tentatives ajustent avec la distribution empirique.

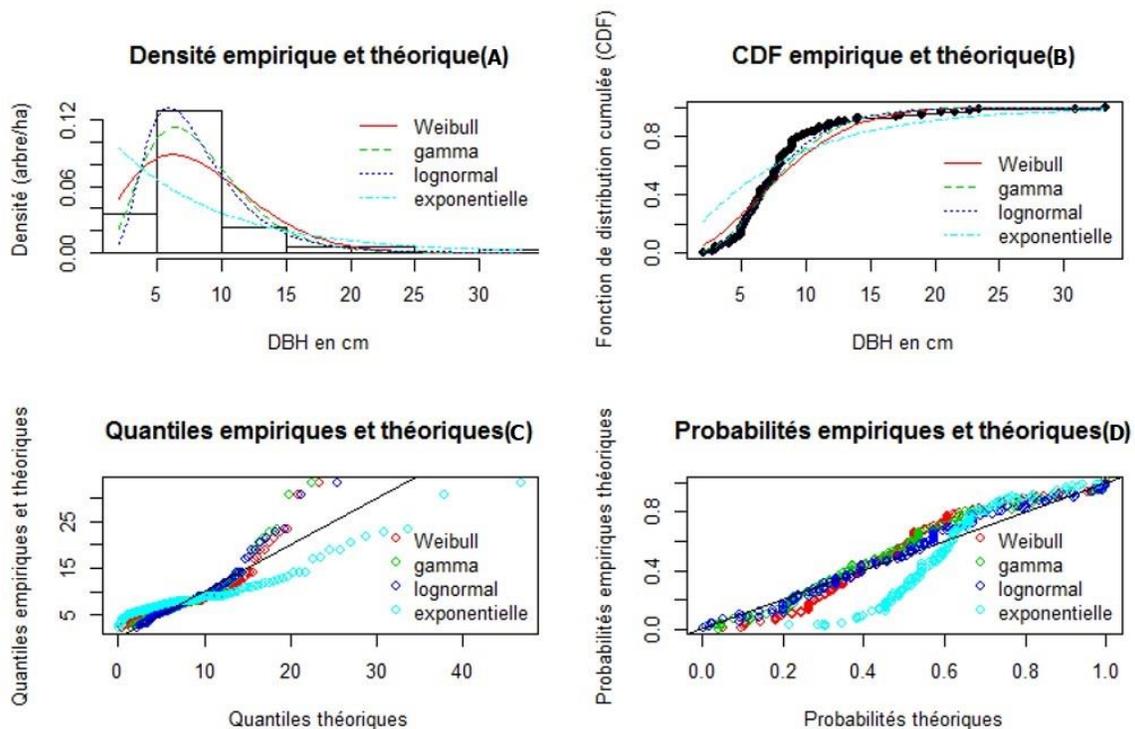
Figure 44: Choix du modèle de distribution des DBH à Alénakiri



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Ce graphique à quatre figures évalue la justesse des ajustements des différentes distributions. En effet, la figure A du graphique 2 présente les ajustements entre le croisement des densités théoriques et des densités empiriques. A cet effet, selon cette figure le modèle Log-normal ajuste mieux la distribution du peuplement des mangroves d'Alénakiri. Ce modèle est suivi de la distribution Gamma. En effet, la figure B du graphique 2 indique un éloignement du cumul de distribution empirique et de la distribution théorique. La figure 3 met en exergue l'ajustement des queues de distribution des quantiles. A cet effet, les distributions Log-normale et Gamma ont les queues des quantiles bien ajustées à gauche jusqu'aux coordonnées (15 ; 15). À l'exception de la distribution Log-normale, le reste des distributions sont bien ajustées au centre (Graphique 2, ci-après).

Graphique 2 : Appréciation du modèle de distribution de DBH des mangroves d'Alénakiri



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Le critère d'information d'Akaike est favorable au modèle logarithme népérien (Log-normale). En effet, le modèle de distribution Log-normale a le plus petit AIC : 783,22 et viennent les distributions Gamma, Weibull et Exponentielle avec respectivement 802,69 ; 835,93 et 922,19 AIC. Cet ordre de distribution est également confirmé par le critère d'information bayésien (BIC)

qui est de 789,22 pour Log-normale ; 808,68 pour Gamma ; 841,93 pour Weibull et enfin 925,18 pour la distribution Exponentielle (Tableau 21, ci-après).

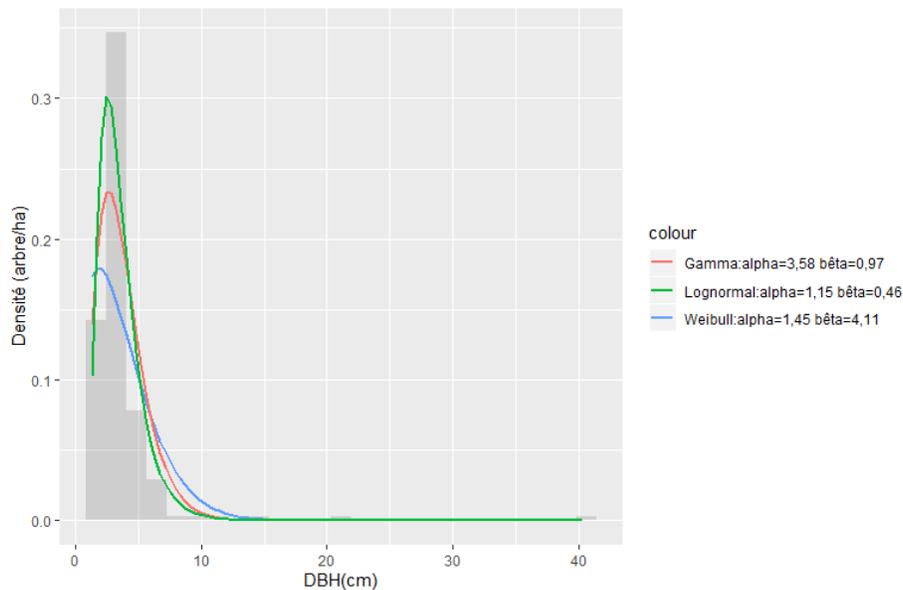
Tableau 21 : Modèle de distribution ajusté pour Alénakiri et leurs critères d'appréciation

Distribution de probabilité	Critère			Critère			
	d'information d'Akaike (AIC)	Kolmogorov-Smirnov	Cramer-von Mises	Anderson-Darling	d'information bayésien (BIC)	α	β
Weibull	835,93	0,17	1,14	6,79	841,93	1,89	9,33
Gamma	802,69	0,14	0,55	3,33	808,68	4,48	0,54
Lognormal	783,22	0,1	0,25	1,58	789,22	1,99	0,45
Exponentielle	922,18	0,33	4,6	22,94	925,18	0,12	-

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

De plus, les tests de Kolmogorov – Smirnov, Cramer-Von Mises et d'Anderson Darling sont respectivement 0,1 ; 0,25 et 1,58. Cela traduit une absence de différence entre les données mesurées et les données simulées. La valeur α de la distribution Log-normale est de 1,99. Et comme α est compris entre $1 < \alpha < 3,6$ décrit une distribution asymétrique à droite donc positive caractéristique d'une population à faible potentiel de régénération lié aux actions exogènes dans les individus de petit diamètre ; nous pouvons admettre que les mangroves d'Alénakiri ont été modifié par un facteur non naturel. Cela se traduit par l'entrecroisement des courbes de distribution (Histogramme 13, ci-après).

Histogramme 13 : Allure générale des courbes de distribution de DBH pour Alénakiri

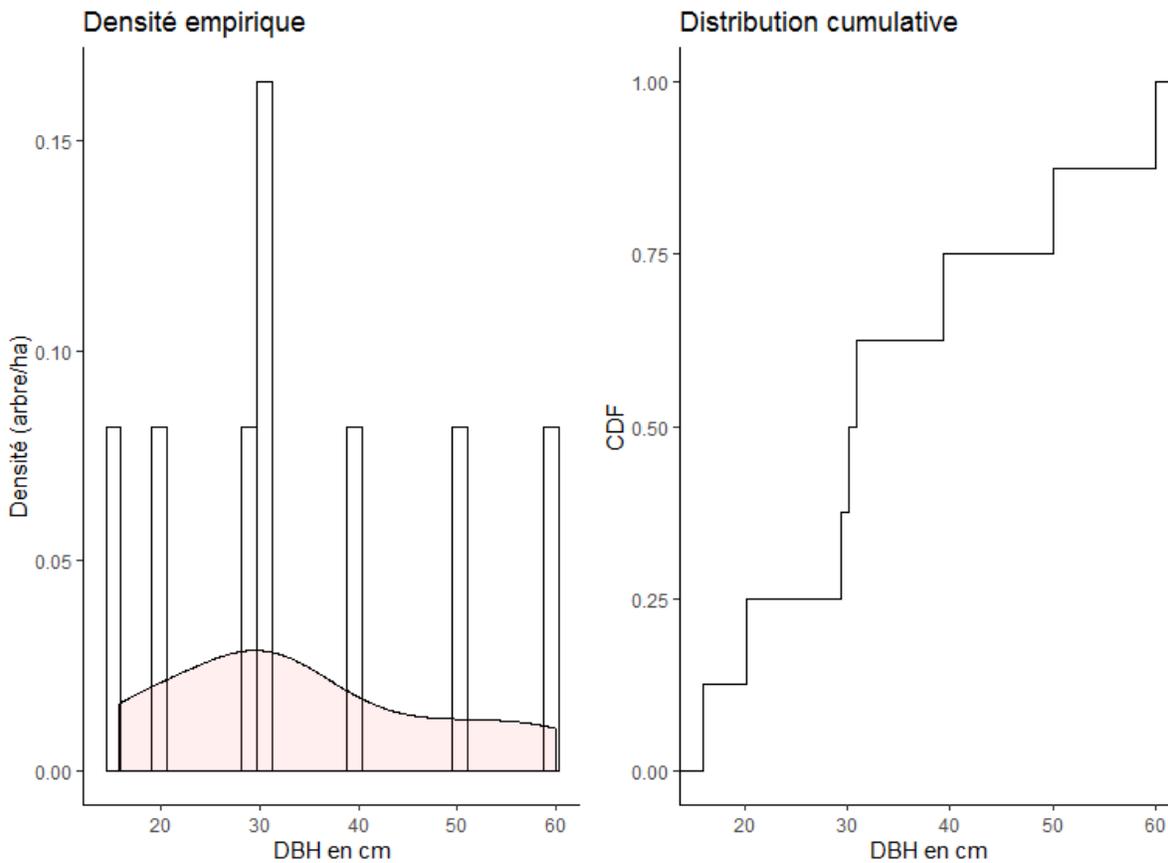


Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

2.1.2. Remboué

Les mangroves de la Remboué ont un DBH compris entre 15,8 et 60 cm ainsi qu'une moyenne et médiane respective de $34,42 \pm 5,22$ et 30,45. Les individus de calibre de 30 cm oscillent 17 ind ha^{-1} . Et les calibres 15,8 ; 20 ; 29 ; 40 ; 50 ; et 60 cm de DBH ont 8 ind ha^{-1} . Il ressort que plus la prédominance des gros arbres limitent la densité d'arbre par hectare. C'est cela qui justifie les lacunes dans l'histogramme de distribution continue. Il y'a lieu de signaler que dans le cadre d'une distribution discontinue c'est-à-dire en classe ces lacunes pourraient ne pas être visibles. Il suffit d'observer l'histogramme 14 de densité, ci-après. Cette procédure a l'avantage d'avoir des ajustements relativement plus précis que si les données auraient été regroupées en classe. En contrepartie, elle est plus rude dans l'interprétation des données ; d'où le recourt au coefficient α pour aider à l'interprétation des distributions observées.

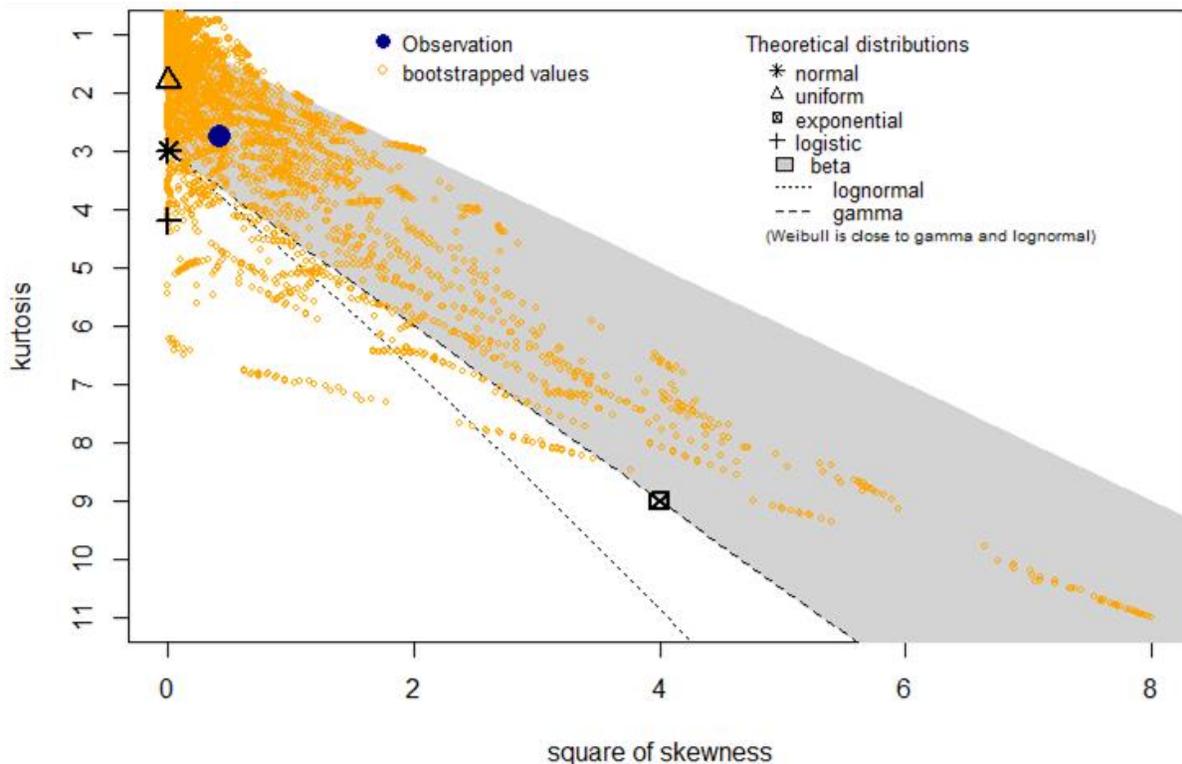
Histogramme 14 : Ajustement du modèle de distribution retenu pour le DBH des mangroves de la Remboué



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Le test graphique de Cullen et Frey élimine l'hypothèse d'une distribution uniforme, normale, logistique et exponentielle. Ainsi, les distributions potentielles sont Gamma, Wiebull et Log-normale. En effet, en haut à gauche du graphique nous avons les distributions normales, uniforme et logistique qui ont 0 de coefficient de Skewness et respectivement 1,97 ; 3 et 4,2 de coefficient de Kurtosis. Et la distribution exponentielle quant à elle a un coefficient de Skewness et Kurtosis de 9 et 4 chacun. Les données empiriques en bleu se superposent à l'échantillonnage aléatoire en jaune simulé à 10000 tentatives (Figure 43, ci-après).

Figure 45: Choix du modèle de distribution des DBH de Remboué selon Cullen et Frey

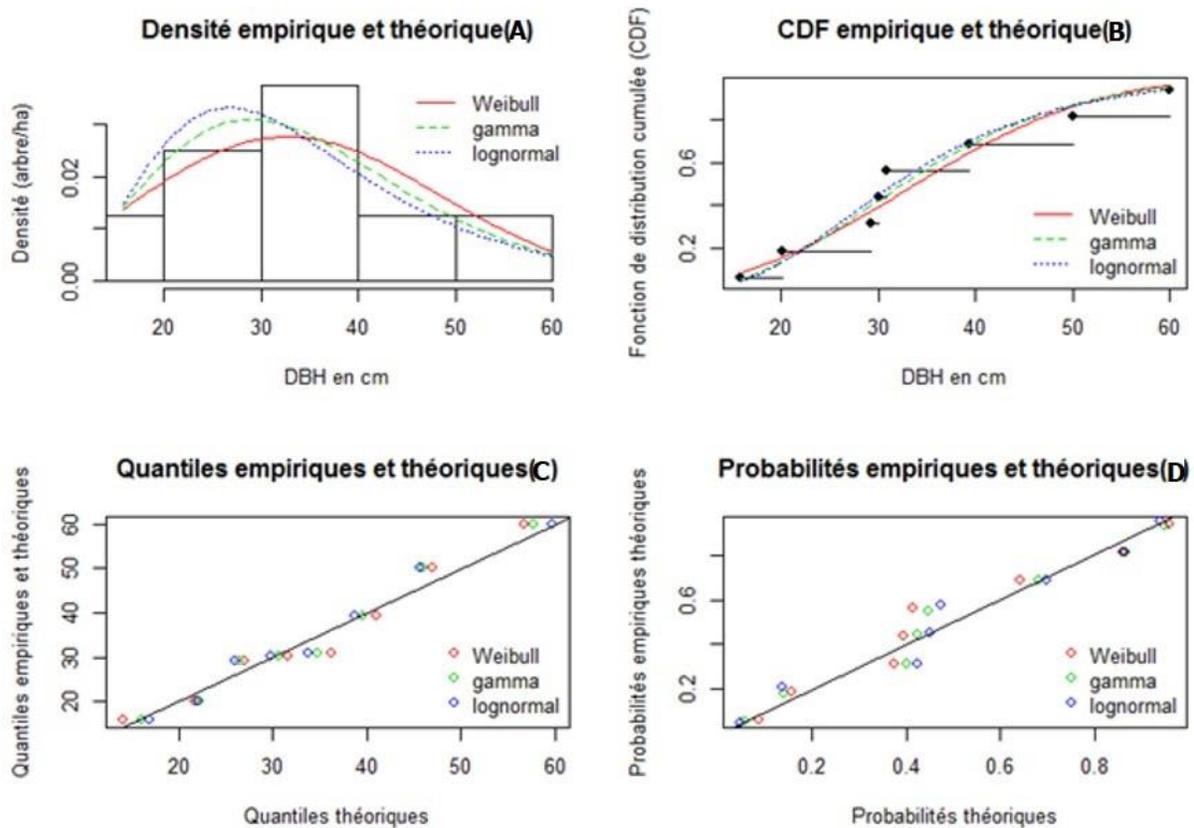


Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Le croisement des densités empiriques aux densités théoriques laisse transparaître un histogramme en forme de cloche. La classe [30-40[est la plus élevée suivie de la classe [10-20[. Un écart de queue de la distribution Wiebull à gauche et l'écart au centre de la fonction de la distribution cumulé écarte la possibilité de retenir la distribution de Wiebull. L'insuffisance de donnée ne permet pas d'apprécier la distribution des queues des quantiles et la probabilité de distribution des centres. Toutefois, on aperçoit les spectres des trois distributions à gauche et à droite de chaque queue. De plus, les valeurs de probabilités de distribution des DBH est contenu dans la plage 0 et

1 (Graphique 9, ci-après). Naturellement, si les données étaient normalement distribuées les valeurs de probabilités seraient plutôt de 1 à 1 et non de 0 à 1, comme c'est le cas maintenant (Kibet Langat et *al.*, 2019).

Graphique 9: Appréciation du modèle de distribution de DBH des mangroves de la Remboué



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

La distribution Gamma, la distribution Log-normale et la distribution Weibull ont respectivement 67,83 ; 67,84 et 68,20 de coefficient AIC. La distribution Gamma a le plus petit AIC donc il ajuste mieux les mangroves de la Remboué. Les coefficients test de Kolmogorov-Smirnov, Cramer-Von Mises et du test d'Anderson Darling sont acceptables pour l'ensemble de distribution, mais selon ces critères la distribution Gamma vient en 2^{ème} position après la distribution Log-normale. Par contre, le critère d'information Bayésien (BIC) est de 67,98 donc le plus petit que celui de Log-normale qui est de 68 (Tableau 22, ci-après).

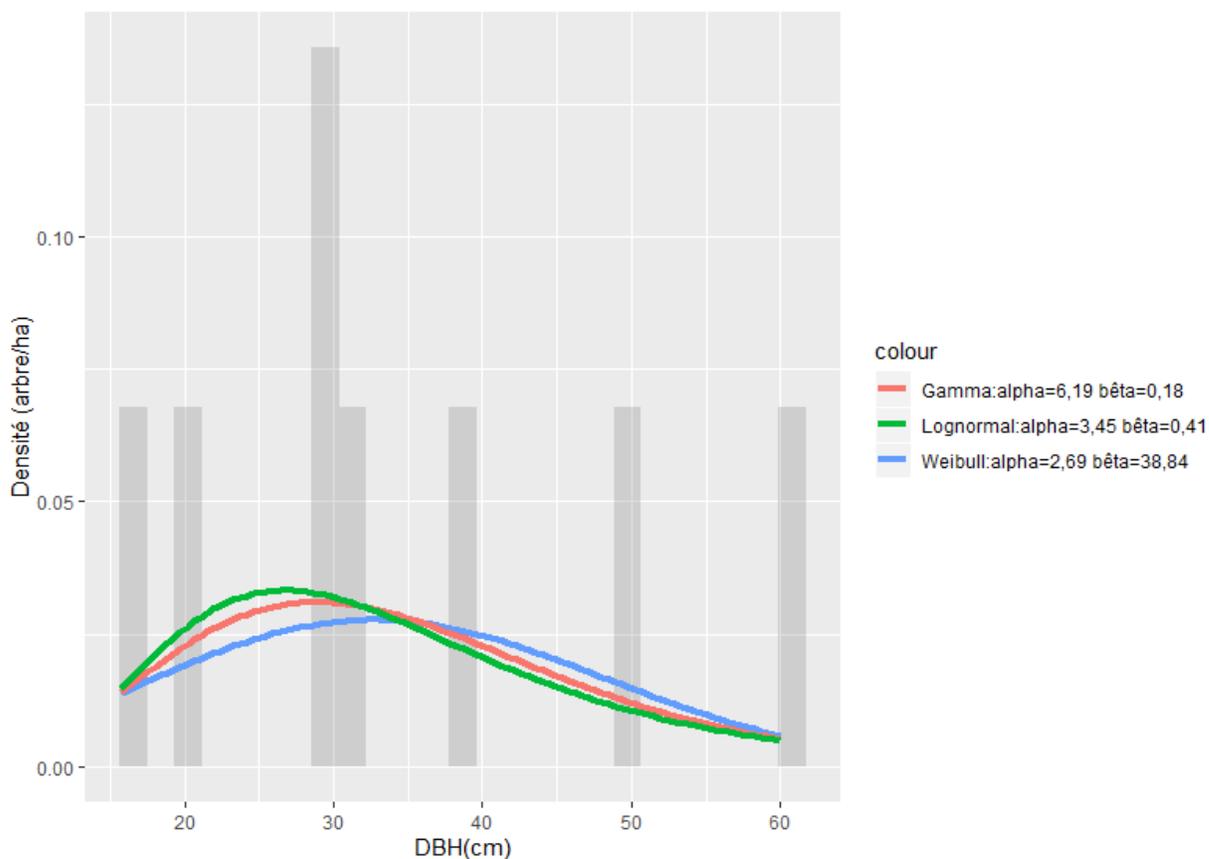
Tableau 22: Modèle de distribution ajusté pour les mangroves de la Remboué et leurs critères d'appréciation

Distribution de probabilité	Critère				Critère d'information bayésien (BIC)	α	β
	d'information d'Akaike (AIC)	Kolmogorov-Cramer-von Smirnov	Mises	Anderson-Darling			
Weibull	68,20	0,210	0,044	0,256	68,36	2,69	38,84
Gamma	67,83	0,179	0,0376	0,227	67,98	6,19	0,18
Lognormal	67,84	0,174	0,0372	0,226	68	3,45	0,41

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Il ressort que la distribution qui ajuste mieux les mangroves de la Remboué reste la distribution Gamma. La valeur α de la distribution Gamma est supérieure à 3,6 ; car il est de 6,19. Normalement une telle circonstance traduit une asymétrie à gauche : c'est-à-dire négative ; or, le coefficient de symétrie (Skewness) est de 0,64 et celui Kurtosis 2,76 (Histogramme 15, ci-après).

Histogramme 15 : Allure générale des courbes de distribution de DBH pour Remboué



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Nous sommes face à une structure proche d'une structure symétrique et leptykurtique. Les mangroves de ce site de la Remboué sont caractérisées par une prédominance d'individu à gros DBH. Ce site est le reflet d'une absence de régénération traduit par une transition des arbres de faible diamètre vers les gros diamètres dus à aux conditions écologiques du milieu. Cela peut également être lié aux conditions de vie des arbres. Cette hypothèse est plus probable pour les sites monospécifique comme c'est le cas dans la Remboué, mais beaucoup dans les forêts artificielles. Comme nous sommes dans une forêt naturelle, c'est plutôt le signe de déclin de la densité de l'espèce lié à la régénération ou à la vitesse de croissance des individus (Husch et *al.* 2003 ; Glèlè et *al.*, 2016 ; Kibet Langat et *al.*, 2019).

D'une manière générale, il ressort que les mangroves estuariennes du Gabon obéissent à un modèle de distribution Log-normale. Elles sont dominées par des individus au petit DBH avec un coefficient α et β respectif de 1,2 et 0,15. Aussi, pour chaque site prit individuellement, en dehors du site de la Remboué qui obéit à une distribution de Gamma, tous les autres sites suivent une distribution Log-normale.

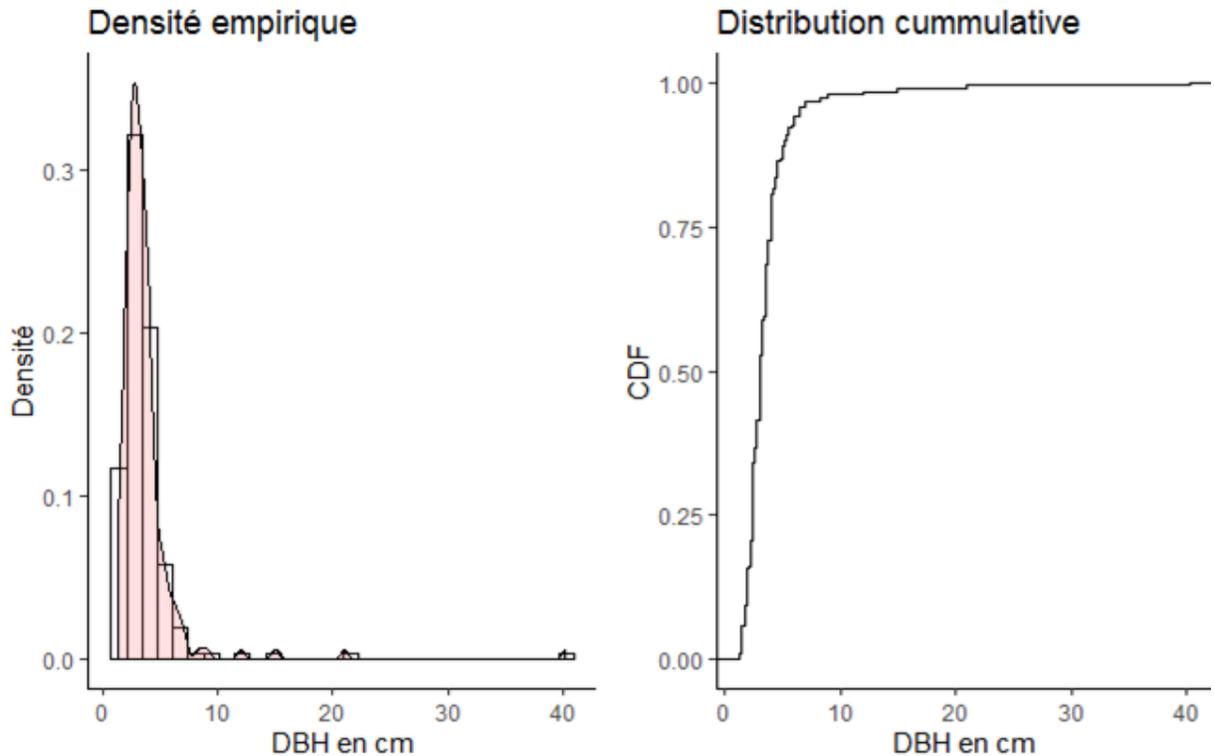
2.2. Estuaire de la Mondah

2.2.1. Essassa

Les mangroves d'Essassa ont un DBH variant entre 1 et 40,3 cm. La moyenne et la médiane DBH sont respectivement de $3,67 \pm 0,24$ cm et 3 cm. Ces deux coefficients témoignent respectivement d'une asymétrie à droite et d'une distribution en forme leptokurtique à longue queue. Cela reflète d'un site dont le plus grand nombre d'individu se situe dans les petites classes c'est-à-dire les individus de petit DBH. En parlant de classe, nous avons affaire à une distribution continue (sans regroupement en classe). Ainsi, une barre d'histogramme équivaut à 1 cm de DBH, étant donné qu'il y'a 10 barres entre 1 et 10 cm de DBH chaque 5 barres correspondent à 5 cm d'amplitude de DBH. Ici l'interprétation peut-être soit individuelle à un calibre de DBH ou regroupe en tenant compte du nombre de barres d'histogramme. De ce fait, à Essassa observe un pic chez les individus de 2 cm de DBH, soit 35 individus par hectare (ind ha^{-1}). En effet, il est rare d'observer plus de 5 arbres à l'hectare pour un DBH supérieur 3 cm. Aussi, une discontinuité est observée au-delà de 10 cm de DBH. À cet effet, seuls 3 arbres par hectare ont un DBH supérieur à 10 cm. Il

s'agit notamment des individus de calibre 12 cm, 15 cm et 40 cm de DBH (Histogramme 16, ci-après).

Histogramme 16 : Ajustement du modèle de distribution retenu pour le DBH des mangroves d'Essassa

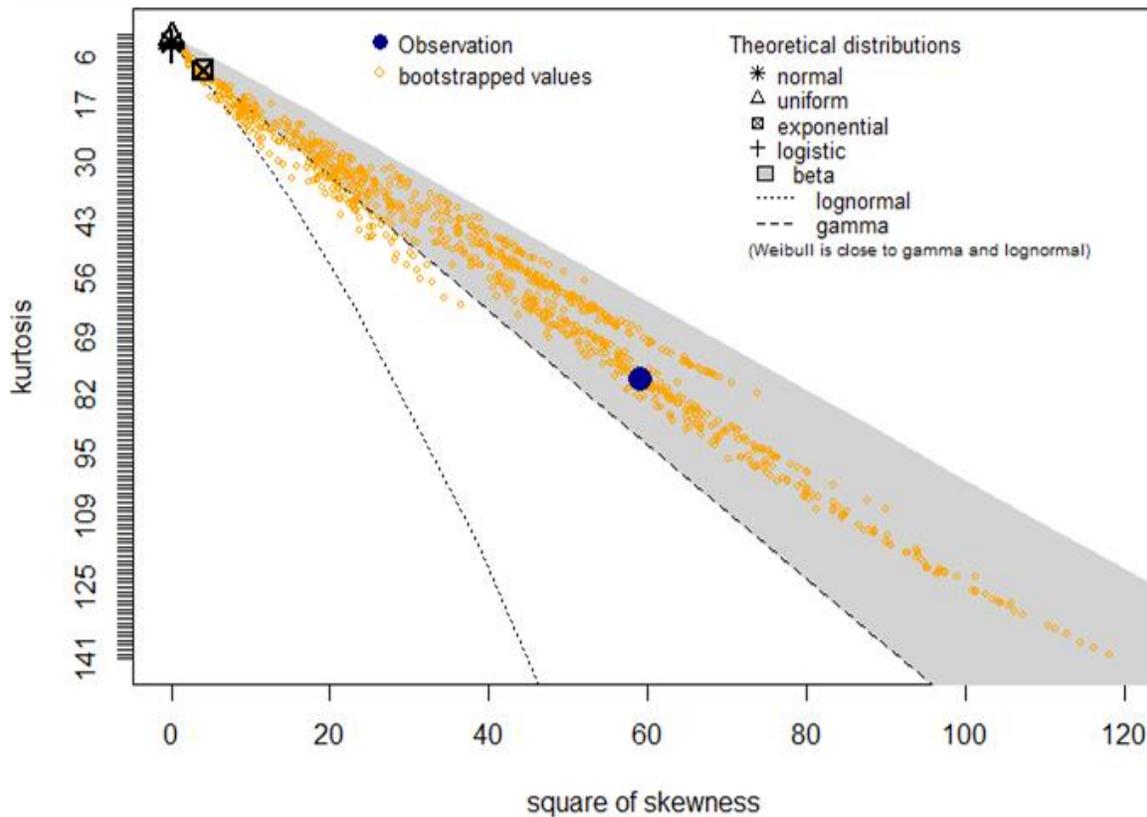


Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Le graphique de Cullen et Frey a diagnostiqué trois familles des distributions proches de la distribution empirique: Log-normale, Gamma et Wiebull. La structure est asymétrique à droite avec un coefficient de Skewness de 7,69 et leptokurtique à longue avec un coefficient de Kurtosis de 78,22. L'estimation d'échantillonnage théorique aléatoire à 10000 essais se suppose à l'échantillonnage empirique. Les distributions normales, uniformes et logistiques à gauche au-dessus ont toutes un coefficient de Skewness égal à 0, or, seule une distribution normale peut être symétrique donc égale à 0. C'est ce fait qui exclut automatiquement les distributions uniforme et logistique. La distribution normale quant à elle est non conforme du fait qu'elle a un coefficient de Kurtosis de 3, or la distribution des mangroves d'Essassa accuse un coefficient de Kurtosis de 78,22. Les

raisons sont aussi valables pour l'inadéquation de la distribution exponentielle (Figure 47, ci-après).

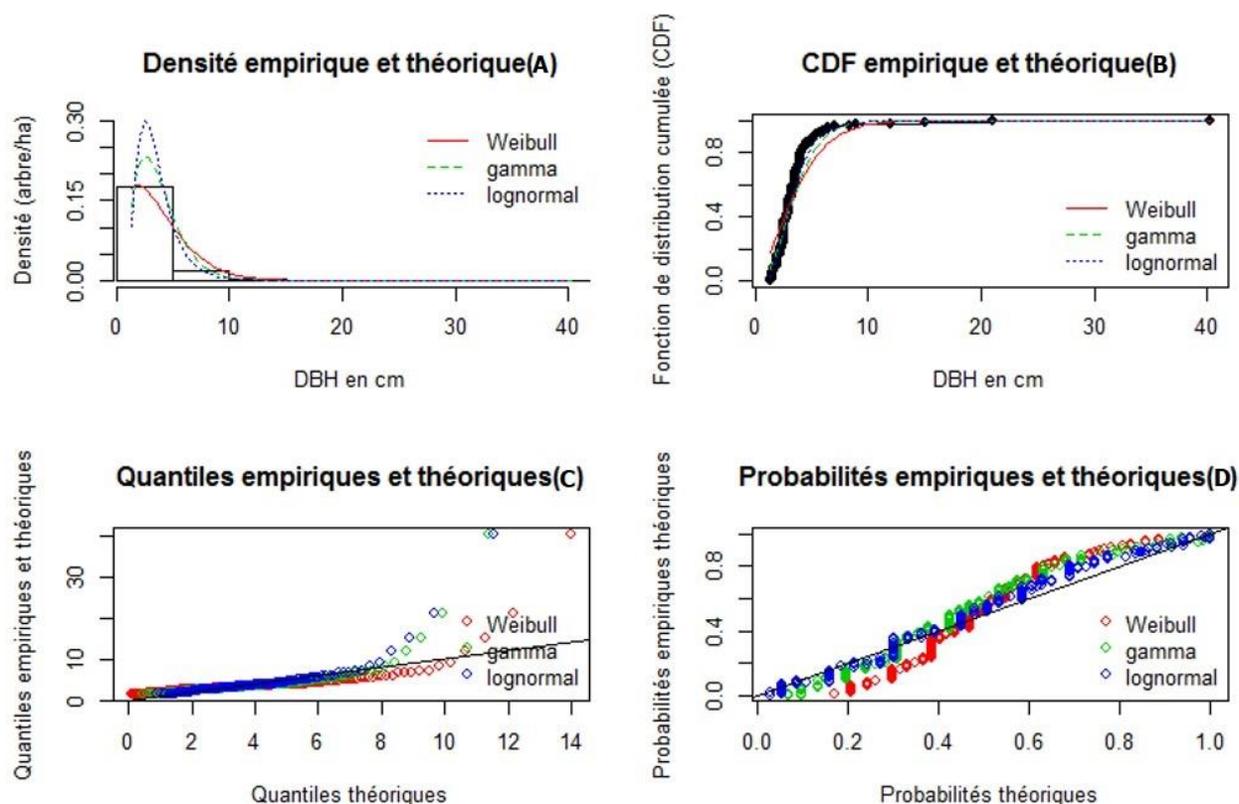
Figure 46: Choix du modèle de distribution des DBH d'Essassa selon Cullen et Frey



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

L'observation de la figure 1 dans graphique 3 penche en faveur de la distribution Log-normale suivit Gamma comme distribution adaptée à Essassa. La fonction de distribution cumulée empirique et théorique tranche également en faveur des distributions Log-normale et Gamma au vu de l'allure entre les courbes cumulées théoriques et la courbe empirique (Figure 2 du Graphique 3). Dans la figure 3 est constaté un ajustement parfait des queues quantile à gauche, tandis que les queues quantiles droites ne s'ajustent parfaitement. Bien que le centre des distributions a un ajustement acceptable excepté la distribution de Wiebull, néanmoins, la distribution Log-normale est plus proche de la droite des probabilités empiriques (Graphique 3, ci-après).

Graphique 3 : Appréciation du modèle de distribution de DBH des mangroves d'Alénakiri



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Le critère d'information d'Akaike a isolé le modèle logarithme népérien (Log-normale). En effet, le modèle de distribution Log-normale a le plus petit AIC : 689,18 de Gamma et exponentielle avec un AIC commun de 757,33. Ces deux dernières distributions sont départagées par le test de Kolmogorov dont Gamma et Exponentielle ont respectivement 0,13 et 0,32 respectivement (Tableau 23, ci-après).

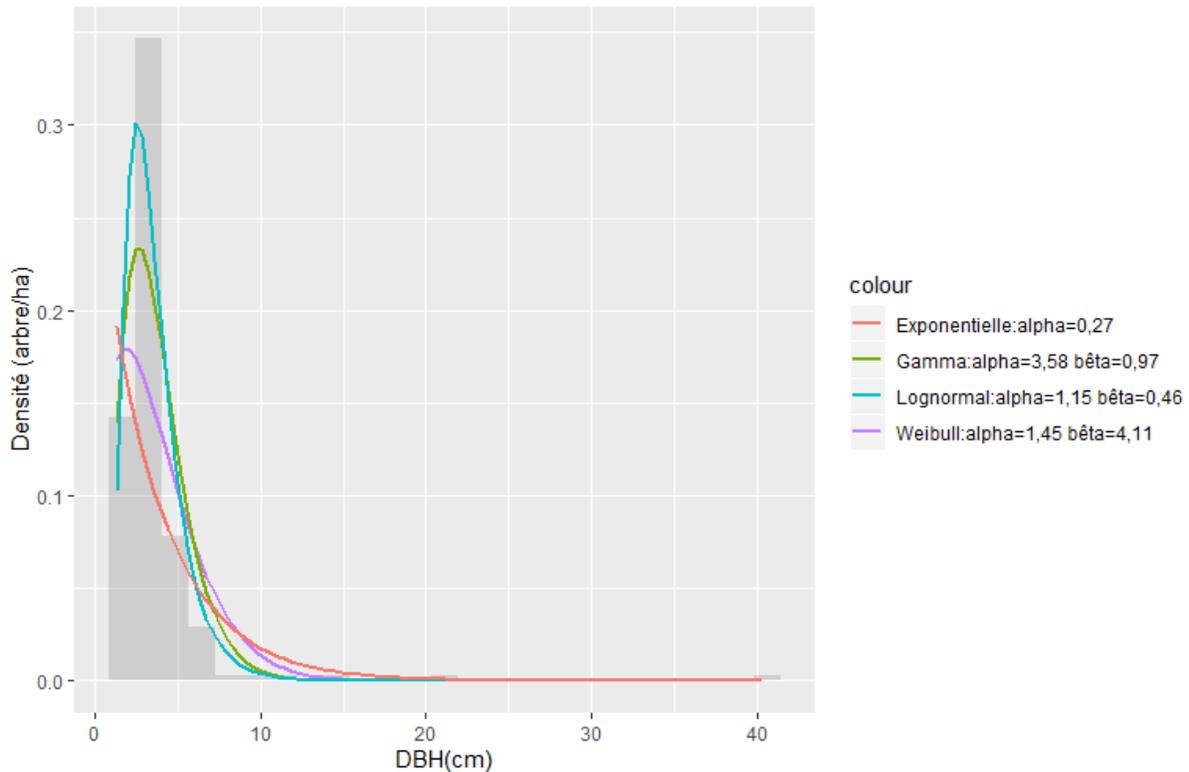
Tableau 23 : Modèle de distribution ajusté pour Essassa et les critères d'appréciation

Distribution de probabilité	Critère				Critère		
	d'information d'Akaike (AIC)	Kolmogorov-Smirnov	Cramer-von Mises	Anderson-Darling	d'information bayésien (BIC)	α	β
Weibull	823,75	0,20	2,71	15,98	830,24	1,45	4,11
Gamma	757,33	0,16	1,23	7,38	763,82	3,58	0,97
Lognormal	689,18	0,1	0,37	2,44	695,68	1,15	0,46
Exponentielle	757,33	0,32	5,82	29,82	763,82	0,27	-

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

La valeur α de la distribution Log-normale est de 1,15 ; donc comprise entre $1 < \alpha < 3,6$. Cela confirme l'asymétrie à droite de la distribution Log-normale et caractérise une population de mangrove à faible potentiel de régénération. Les valeurs alpha (α) varient entre 0,27 et 3,58 avec les distributions Log-normale (1,15) et Weibull (1,45) qui sont entre $1 < \alpha < 3,6$ ce qui expliquent le croisement des courbes de distributions (Histogramme 17, ci-dessous). Alors, les mangroves d'Alénakiri ont une forte capacité de régénération.

Histogramme 17 : Allure générale des courbes de distribution de DBH pour Alénakiri

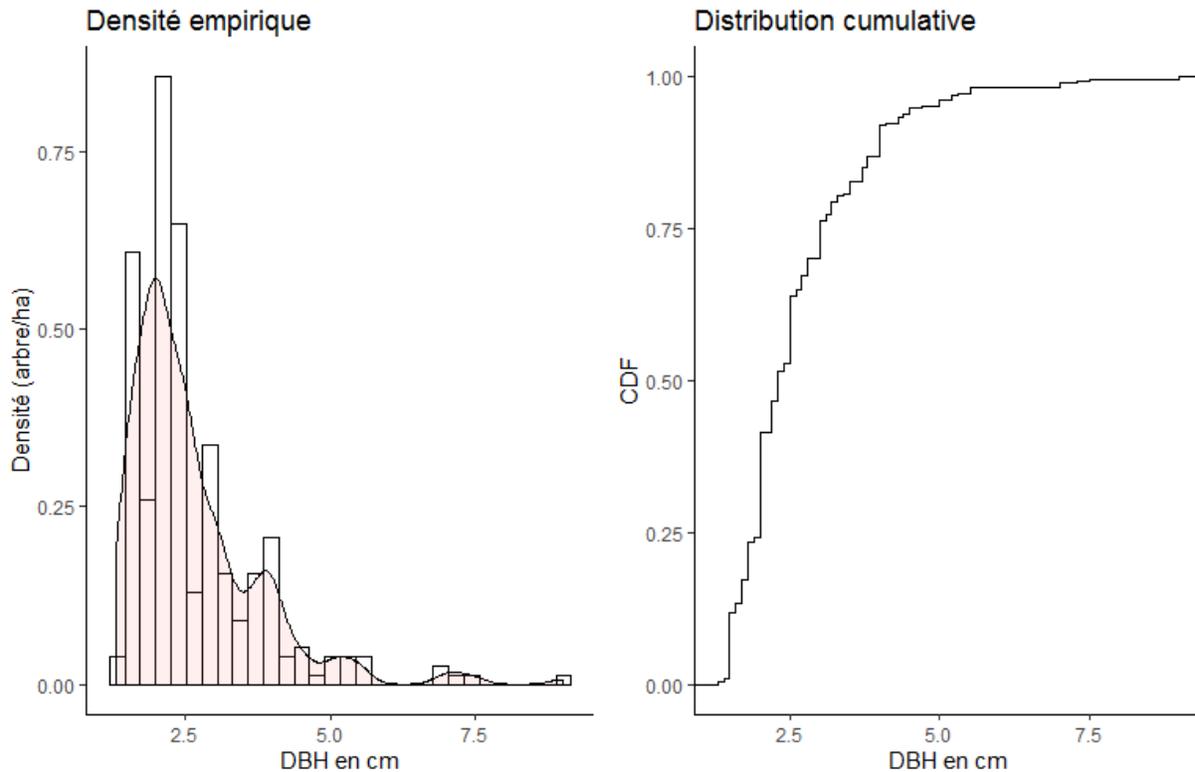


Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

2.2.2. Oveng

Oveng a la particularité de posséder 291 individus répertoriés dont le DBH varie entre 1,3 et 9 cm. Avec une moyenne et médiane respective de $2,63 \pm 0,06$ cm et 2,3 cm. Au regard de ces caractéristiques, Oveng a une mangrove dont les petits individus sont les plus abondants. En effet, à 2 cm DBH nous enregistrons 80 ind ha^{-1} , suivit 2,5 cm DBH qui totalisent 60 ind ha^{-1} et 2 cm DBH avec 58 ind ha^{-1} . Les individus de plus de 4 cm de DBH sont inférieurs 10 ind ha^{-1} (Histogramme 18, ci-après).

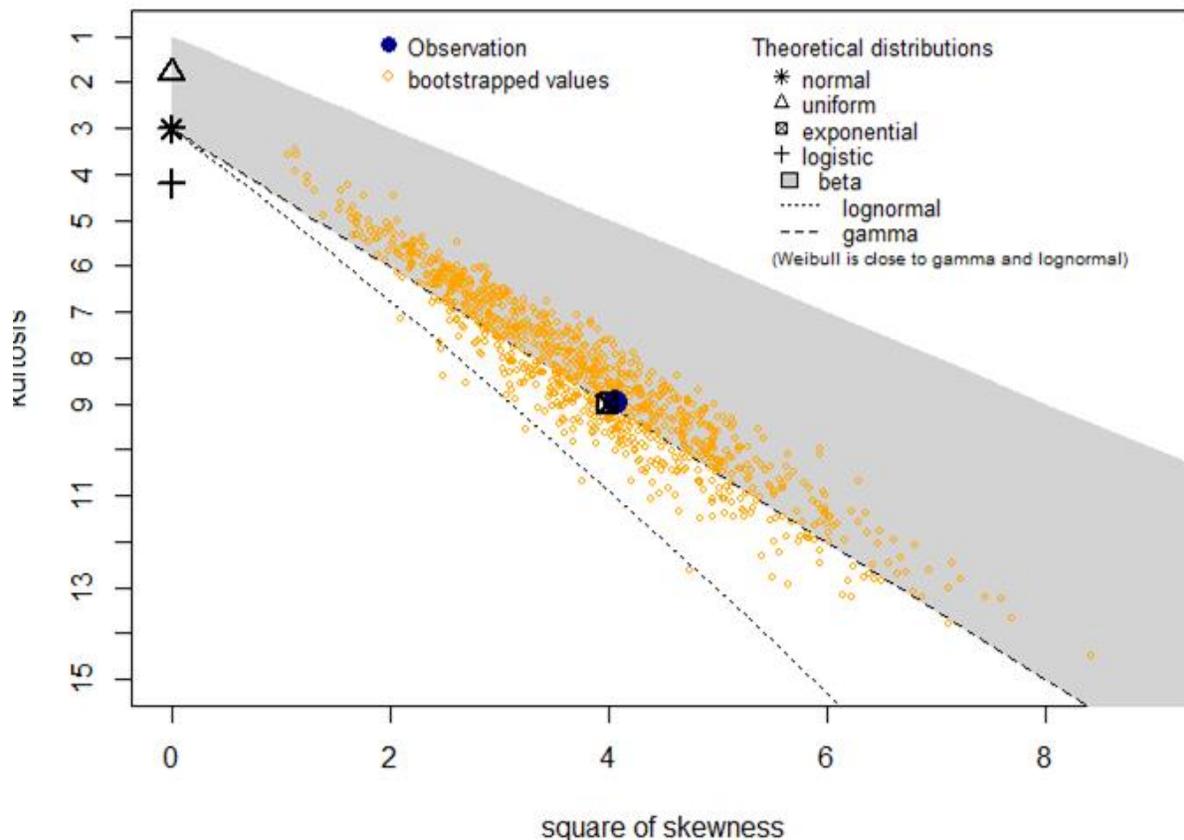
Histogramme 18 : Ajustement du modèle de distribution retenu pour le DBH des mangroves d'Oveng



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Le test graphique de Cullen et Frey a isolé quatre potentielles familles des distributions: Log-normale, Gamma et Weibull et Exponentielle. Par ailleurs, les distributions normales, uniformes et logistiques à gauche au-dessus ont été exclues des distributions potentielles. En effet, elles ont toutes un Skewness égal à 0. Et comme seule une distribution normale est symétrique, alors la distribution logistique et uniforme ne peuvent pas s'ajuster aux mangroves d'Oveng. Aussi, la distribution normale ou symétrique ne peut avoir un coefficient de Kurtosis inférieur ou supérieur à 3. Or ici, la distribution est diagnostiquée à 8,97 de coefficient de Kurtosis; c'est ainsi que la distribution normale est également non retenue, car un tel coefficient est dit leptokurtique à queue longue (Figure 48, ci-après).

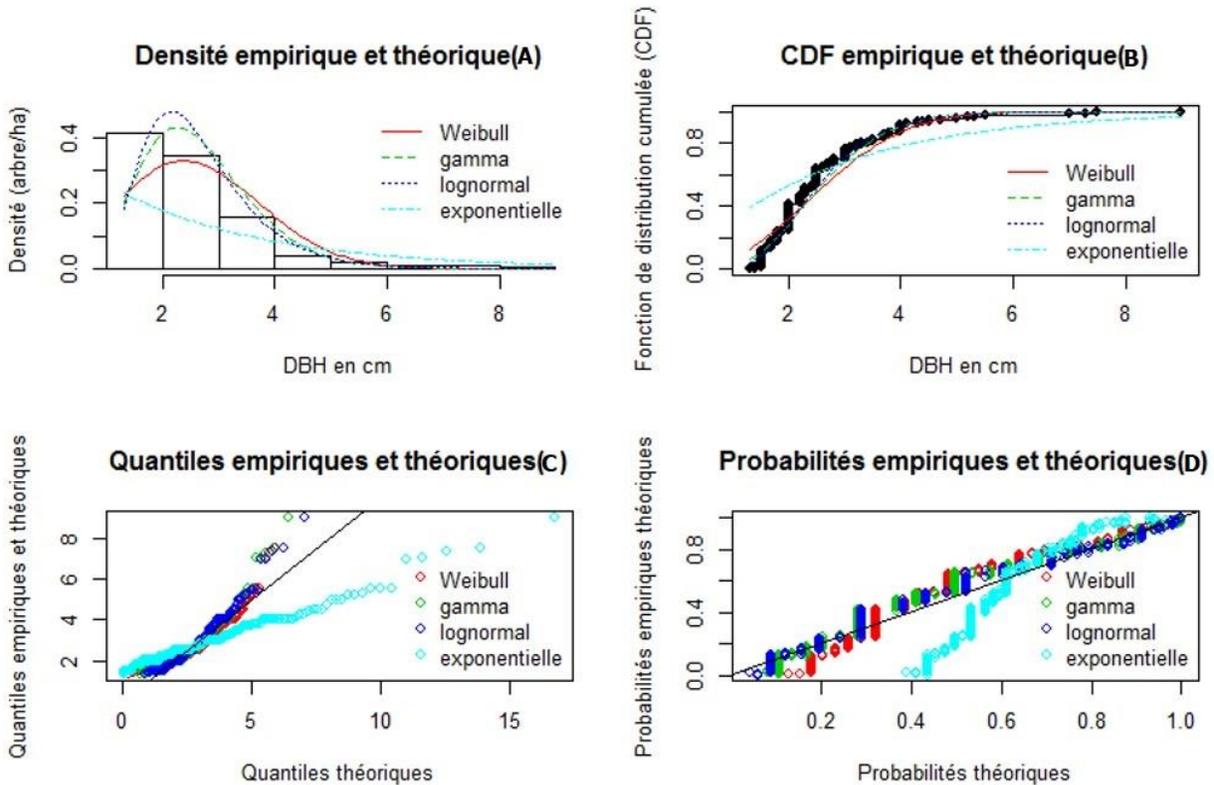
Figure 47: Choix du modèle de distribution des DBH d'Oveng selon Cullen et Frey



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Il ressort de l'observation de la figure 1 du graphique que la distribution Log-normale ajuste au mieux les mangroves d'Oveng suivi de la distribution Gamma. A cela, la distribution Exponentielle et Weibull sont en-dessous de la distribution empirique avec respectivement une estimation maximale de 21 et 32 arbres par hectare. La valeur maximale de l'estimation empirique est à 40 arbres par hectare. En effet, les distributions Weibull et Exponentielle sont les plus éloignées de la distribution cumulée empirique en comparaison aux distributions Log-normale et Gamma (Figure 2 du Graphique 4, ci-après). Les queues des quantiles de l'ensemble de distribution sont bien ajustées à gauche et mal ajustées à droite (Figure 3 du Graphique 4, ci-après). Aucune des distributions n'est parfaitement ajustée au centre, toutefois, la distribution Log-normale est acceptable (Figure 4 du Graphique 4, ci-après).

Graphique 4: Appréciation du modèle de distribution de DBH des mangroves d’Oveng



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Des quatre modèles (Exponentielle, Log-normale, Gamma et Weibull) diagnostiqués par le graphique, les critères d’information d’Akaike (AIC) et de Bayésien (BIC) ont pu isoler la distribution Log-normale. De ce fait, la distribution Log-normale a le plus petit AIC et le plus petit BIC, soit respectivement 759,96 et 767,28. Cette distribution est suivie de Gamma avec un AIC de 792,49 et un BIC de 799,84 (Tableau 24, ci-après).

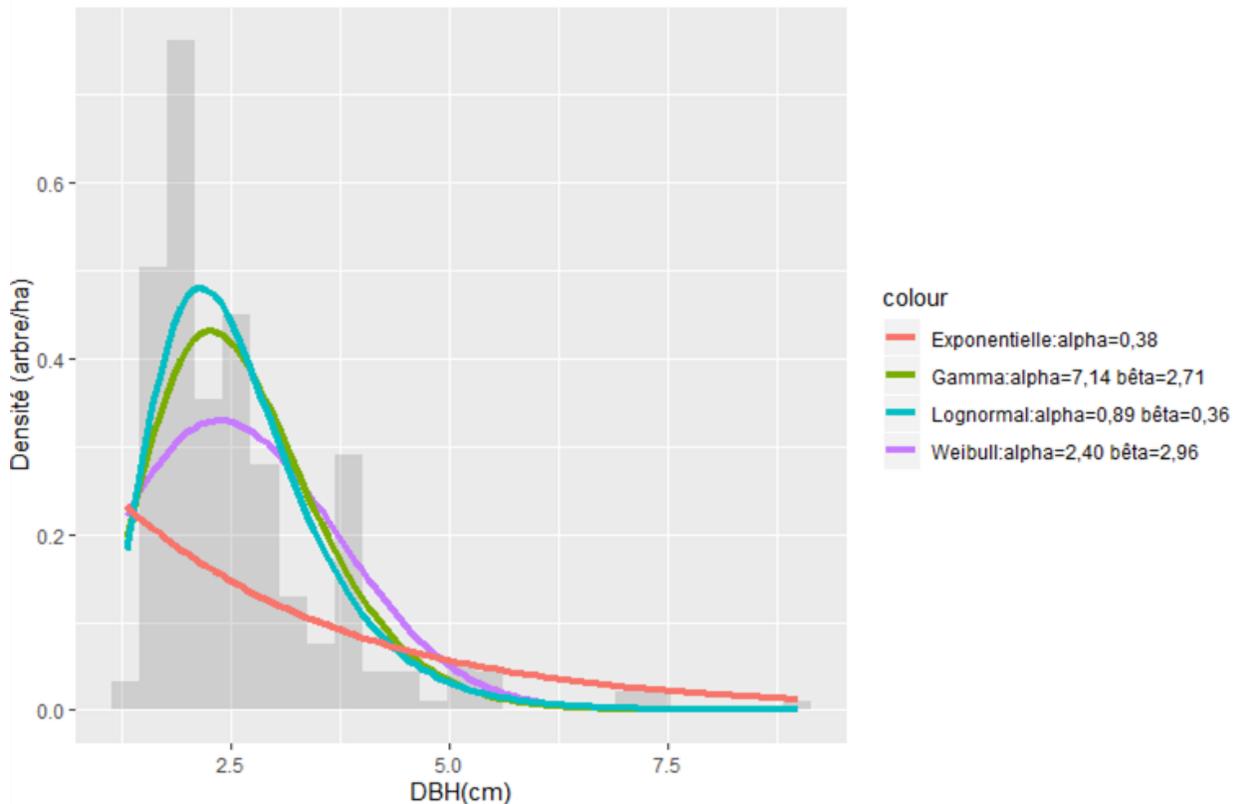
Tableau 24 : Modèle de distribution ajusté pour les mangroves d’Oveng et leurs critères d’appréciation

Distribution de probabilité	Critère				Critère d’information bayésien (BIC)	α	β
	d’information d’Akaike (AIC)	Kolmogorov-Cramer-von Smirnov	Mises	Anderson-Darling			
Weibull	865,92	0,16	1,79	11,10	873,26	2,40	2,96
Gamma	792,49	0,14	1,03	6,02	799,84	7,14	2,71
Lognormal	759,96	0,12	0,64	3,88	767,28	0,89	0,36
Exponentielle	1147,06	0,42	11,60	56,77	1150,73	0,38	-

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Le coefficient α de 0,89 compris entre $1 < \alpha < 3,6$; la mangrove d'Oveng se caractérise alors par une asymétrie à droite qui traduit une population à haute capacité de régénération. Cette population est peu évolutive au-delà d'un DBH supérieur 8 cm (Histogramme 19, ci-après).

Histogramme 19 : Allure générale des courbes de distribution de DBH pour Oveng



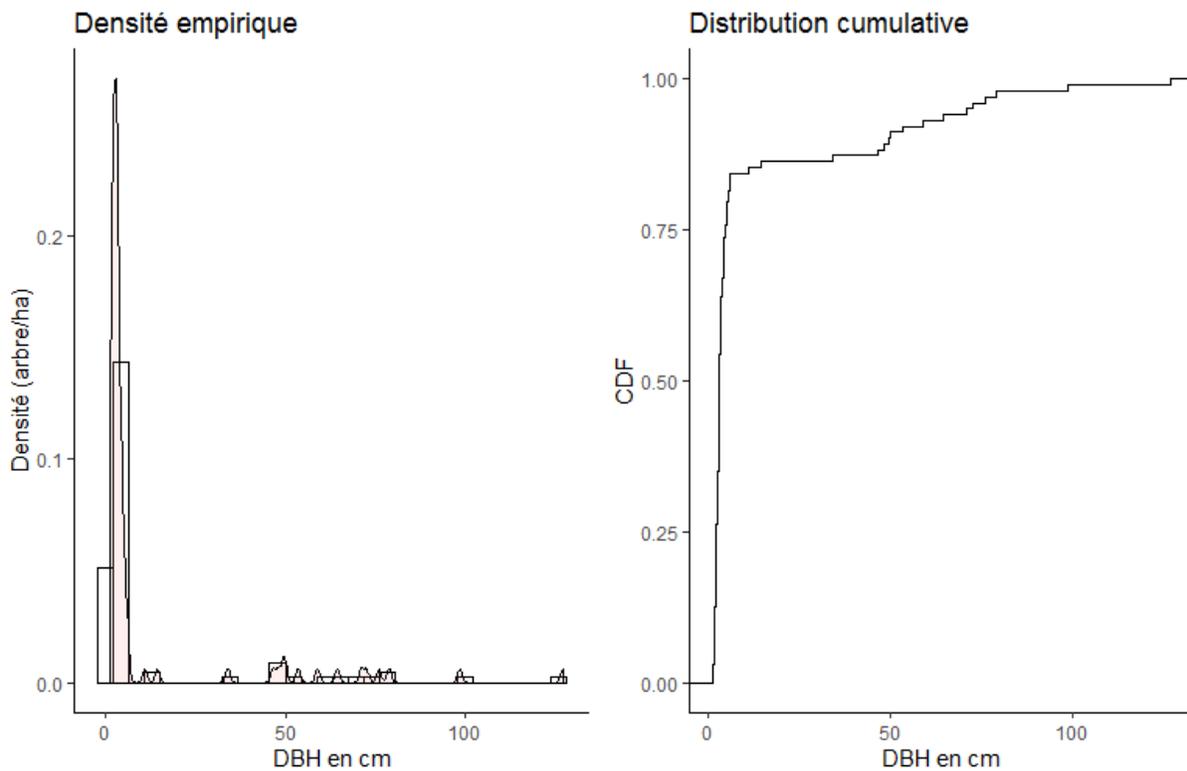
Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

2.2.3. Mamboumba village

Le DBH des mangroves de Mamboumba village varie entre 1,1 cm et 127 cm avec une moyenne et médiane respective de $11,80 \pm 2,30$ et 3 cm. La densité la plus élevée est observée au sein des individus de 2 cm DBH soit, 15 arbres à l'hectare. Ce site a une plage de DBH de 125,9 cm, mais n'enregistre plus de 3 arbres à l'hectare au-delà de 2 cm de DBH. Vu la forte densité dans les individus de faible DBH (1 et 2 cm) nous aurions pensé à un site de fort potentiel de régénération, mais l'abondance des ruptures de DBH dans la structure de diamètre entre 1,1 et 127 cm vient remettre en cause cette hypothèse de site à haut potentiel de régénération. En effet, il n'a

pratiquement pas d'arbre entre 10 et 45 cm, 70 et 99 cm et entre 101 et 126 cm de DBH (Histogramme 20, ci-après). Tout porte à croire que nous sommes face à un site ayant subi un facteur perturbateur qui a modifié les conditions du milieu. Et d'où la présence reliquaire d'arbre aux calibres 46 à 69, 100 et 127 qui témoigne d'une continuité d'arbre par le passé qui a été interrompue par des facteurs exogènes. Pourtant, en forêt naturelle une distribution de quelque forme que ce soit et se caractérise par une fréquence élevée dans la classe des petits. Et par la suite, il s'observe une diminution progressive des individus des petits DBH au profit de gros (Glèlè et *al.*, 2016). C'est ainsi que l'on se retrouve avec une courbe en J. Pour ainsi dire que les gros DBH s'observent dans les structures en J et non dans les structures en L ou en i. Normalement, une structure en déclin normal manifesterait une distribution asymétrique à gauche avec un coefficient de Skewness plus petit que 0, or ici il est de 2,83. A cet effet, nous faisons appelle au test graphique de Cullen et Frey pour déterminer s'il s'agit d'un déclin causé ou non.

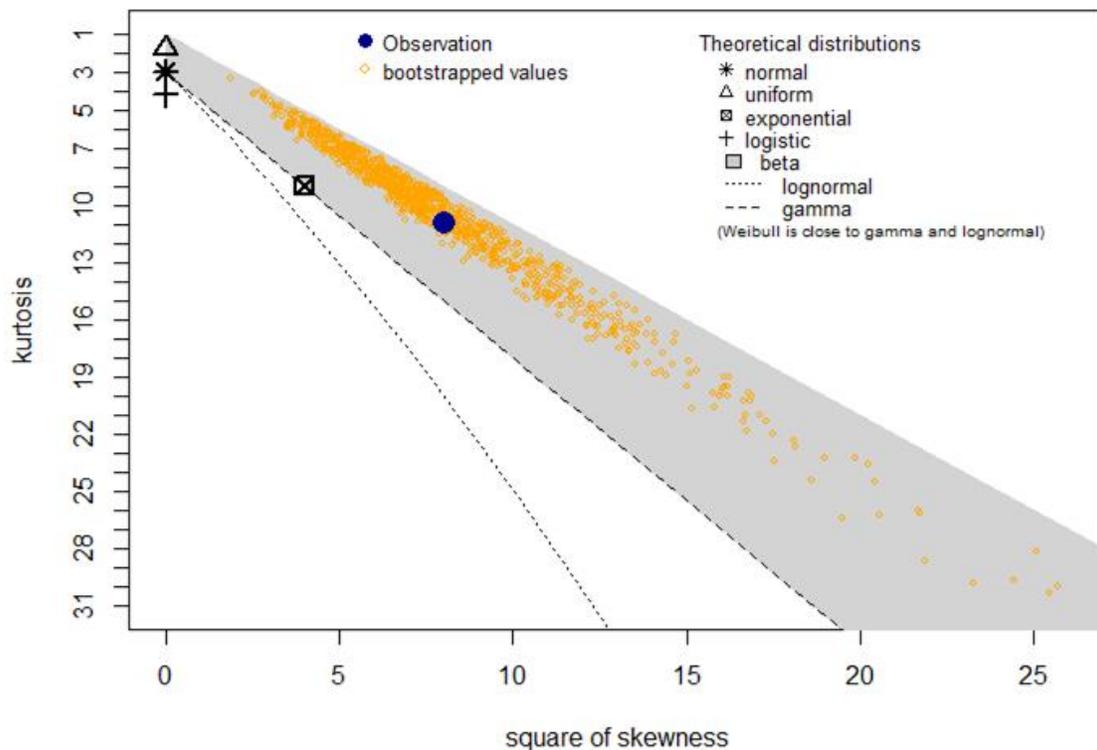
Histogramme 20 : Ajustement du modèle de distribution retenu pour le DBH des mangroves de Mamboumba Village



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Selon le test graphique de Cullen et Frey, la distribution normale, logistique et uniforme sont défacto exclues du fait qu'elles manifestent un coefficient de Skewness de 0, or dans la situation présente le coefficient de Skewness est supérieur à 0 traduisant asymétrie à droite avec un coefficient de Kurtosis de 10,91. Donc, nous avons une structure de forme leptokurtique à longue queue. Alors, ces précédents modèles de distributions de symétrie parfaite ne peuvent pas s'ajuster aux mangroves de Mamboumba village. Par conséquent, les modèles de distribution potentielle sont Weibull, Gamma, exponentiel et Log-normale. Par conséquent, il reste maintenant à savoir qui, des trois distributions potentielles, s'ajoute le mieux à ces mangroves de Mamboumba village (Figure, 49, ci-après).

Figure 48: Choix du modèle de distribution des DBH de Mamboumba Village selon Cullen et Frey

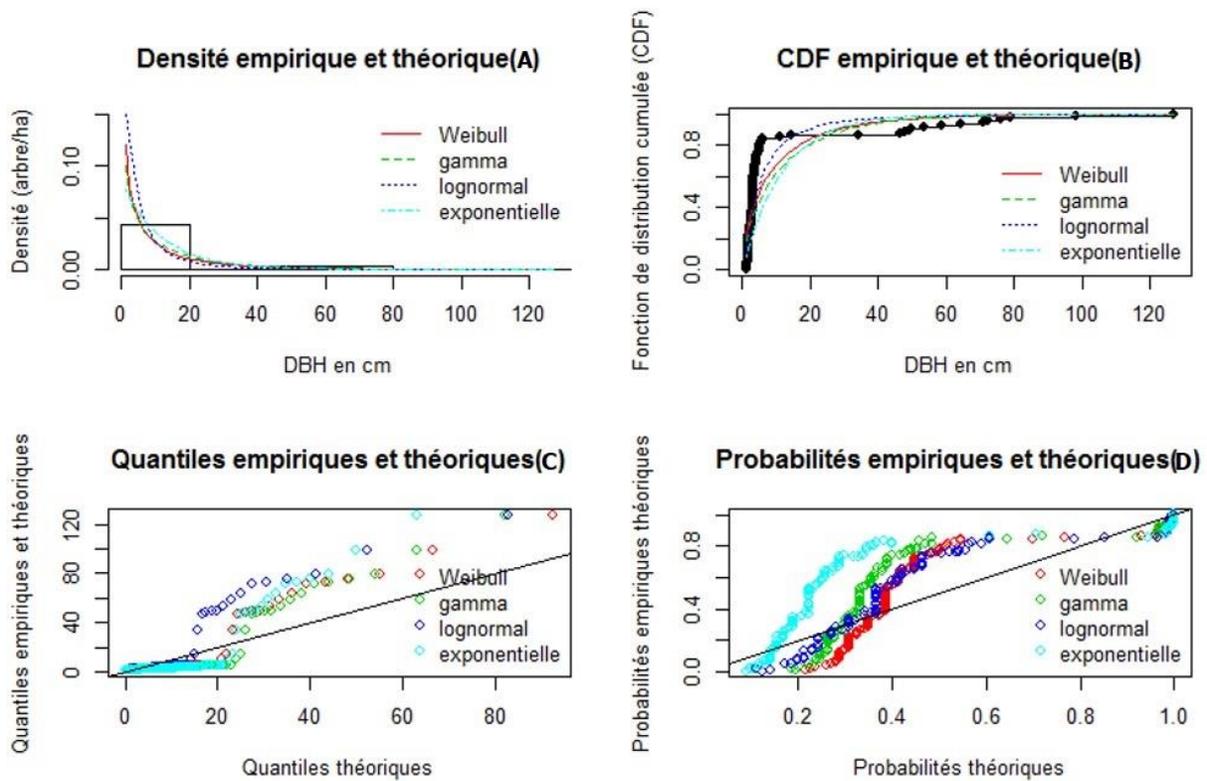


Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

La visualisation du test graphique de performance des modèles de distribution de la figure 1 du graphique présente une allure distributions de densité identique. Dans une telle circonstance il perd en efficacité dans le choix du meilleur modèle à partir du moment où les courbes de distribution se superposent les unes aux autres. Ainsi, dans la fonction de distribution cumulée de la figure

2 du graphique 5, les quatre distributions théoriques ne suivent pas parfaitement la distribution empirique. Toutes les distributions ajustent bien les queues quantiles à gauche, tandis que les queues quantiles de droite sont mal ajustées (Figure 3 du Graphique 5, ci-après). Le centre des distributions s'ajuste mal aux modèles potentielles. Toutefois, l'allure de croisement des probabilités empiriques aux probabilités théoriques semble favorable aux distributions Log-normale et Gamma. Néanmoins, le choix de la meilleure distribution revient aux tests statistiques AIC et BIC appuyé des tests Kolmogorov-Smirnov, Cramer-Von Mises et Anderson-Darling.

Graphique 5 : Appréciation du modèle de distribution de DBH des mangroves de Mamboumba Village



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Dans cette situation ambivalence, nous faisons appel aux critères d'information d'Akaike (AIC) et Bayésien (BIC). En effet, par principe selon ces deux critères de pénalisation, la meilleure distribution est toujours celle qui a la plus petite valeur AIC et BIC. À cet effet, Log-normale enregistre un AIC de 628,08 et un BIC de 633,35. Cela se confirme par les tests de Kolmogorov-Smirnov, Cramer-Von Mises et Anderson-Darling qui sont respectivement de 0,26 ; 1,95 et 10,87. Selon ces mêmes critères la deuxième meilleure distribution est Weibull avec un AIC de 682,70

et BIC de 687,97 que confirme également des coefficients Kolmogorov-Smirnov, Cramer-Von Mises et Anderson-Darling respectifs de 0,29 ; 2,75 et 14,14. (Tableau 25, ci-après).

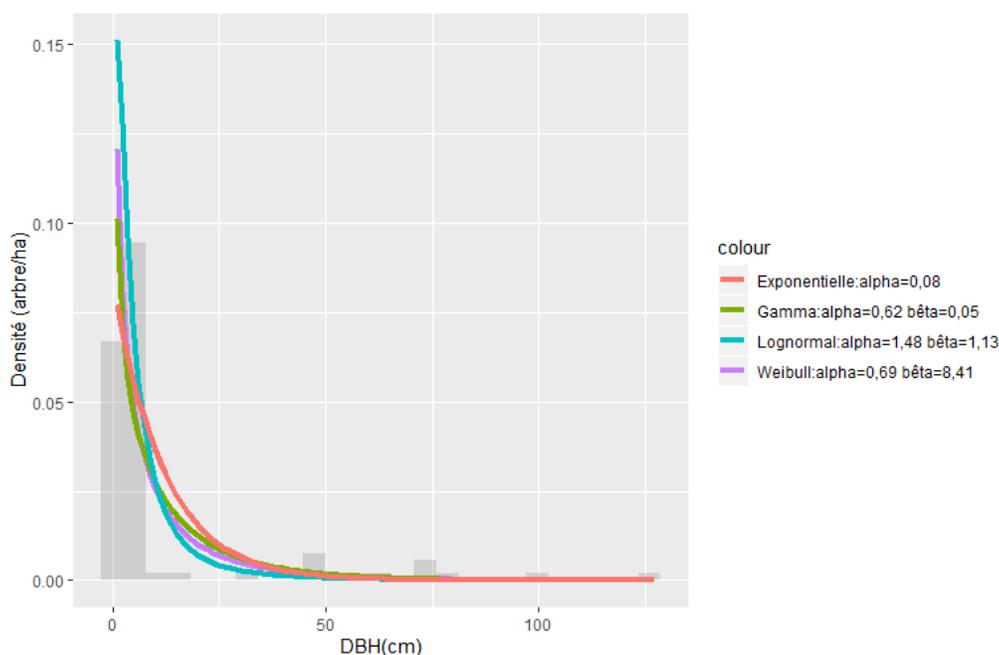
Tableau 25 : Modèle de distribution ajusté des mangroves Mamboumba Village et leurs critères d'appréciation

Distribution de probabilité	Critère d'information d'Akaike (AIC)			Critère d'information bayésien (BIC)		
	Kolmogorov-Smirnov	Cramer-von Mises	Anderson-Darling	α	β	
Weibull	0,29	2,75	14,14	0,69	8,41	687,97
Gamma	0,36	3,62	17,54	0,62	0,05	705,41
Lognormal	0,26	1,95	10,87	1,48	1,13	633,35
Exponentielle	0,44	6,29	30,61	0,08	-	719,16

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Le coefficient α de 1,48 compris entre $1 < \alpha < 3,6$; la mangrove de Mamboumba se caractérise alors par une asymétrie à droite qui traduit une population à faible capacité de régénération. Elle est entravée par des actions exogènes qui fragilisent à la fois les mangroves de gros et petit DBH si bien que dans l'intervalle 1-5 et l'intervalle 45-127 les courbes des distributions des mangroves de Mamboumba ne sont plus distinctes (Histogramme 21, ci-après).

Histogramme 21 : Allure générale des courbes de distribution de DBH pour Mamboumba Village

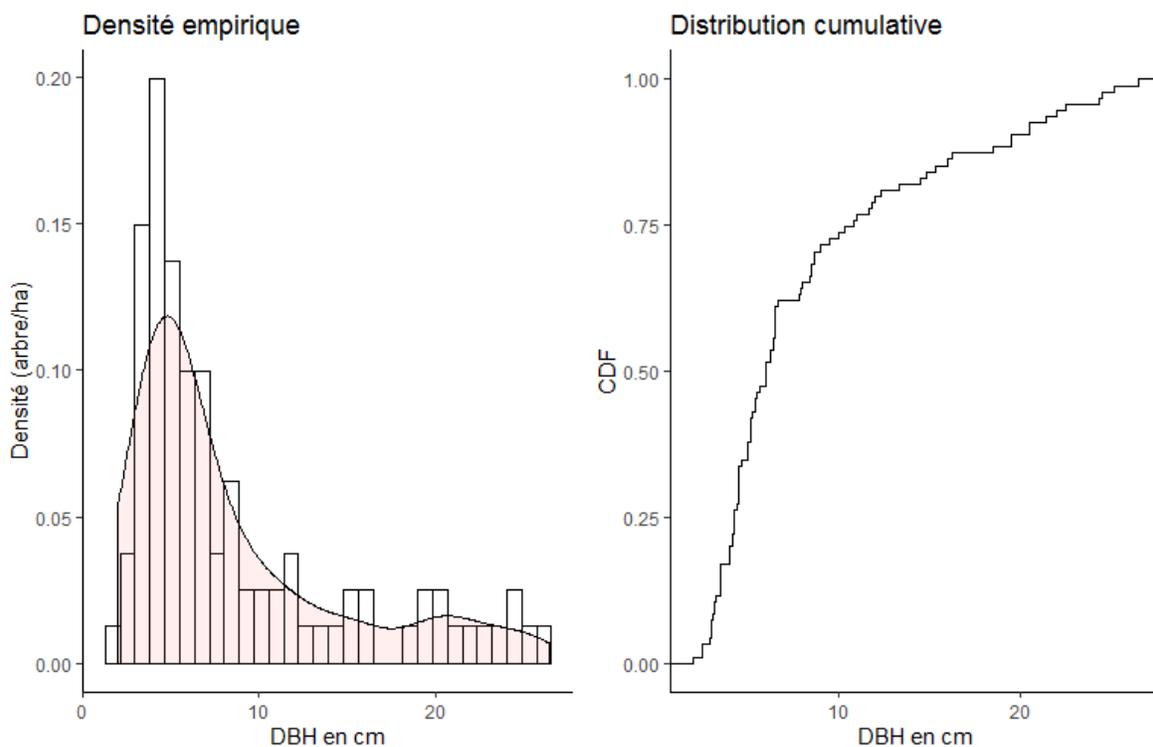


Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

2.2.4. Mamboumba Rivière

Le site de Mamboumba Rivière a des mangroves ayant un DBH compris entre 2 et 26,5 cm, une moyenne et médiane respective de $8,46 \pm 0,63$ et 6 cm et un écart-type de 6,16 cm. Au calibre de 4 cm ce site totalise 20 arbres à l'hectare et 10 arbres par hectare aux calibres 5 et 6 cm avant de chuter 4 arbres et remonter 7 arbres par hectares aux calibres respectifs de 7 et 8 cm. Et entre les calibres 9 et 17 cm la densité par hectare se stabilise aux arbres. Puis, elle remonte 4 arbres par hectare aux calibres de 11 et 12 cm de DBH. Une discontinuité dendrométrique s'observe avec l'absence des calibres 16 et 17 cm de DBH dans les mangroves de la rivière Mamboumba. D'une manière générale, entre 12 cm et 26,5 la densité varie entre 4 et 3 arbres par hectare hormis la lacune évoquée entre 16 et 17 cm (Histogramme 22, ci-après). Tout indique que nous sommes face à un site caractérisé par une population à prédominance relative des individus de petit diamètre. L'alternance des densités observée chez les arbres de 16 cm de DBH et même chez ceux de 8 cm de DBH est liée à la compétition intra-spécifique vue que nous sommes en présence d'un site monospécifique constitué uniquement des *Rhizophora harrisonii*.

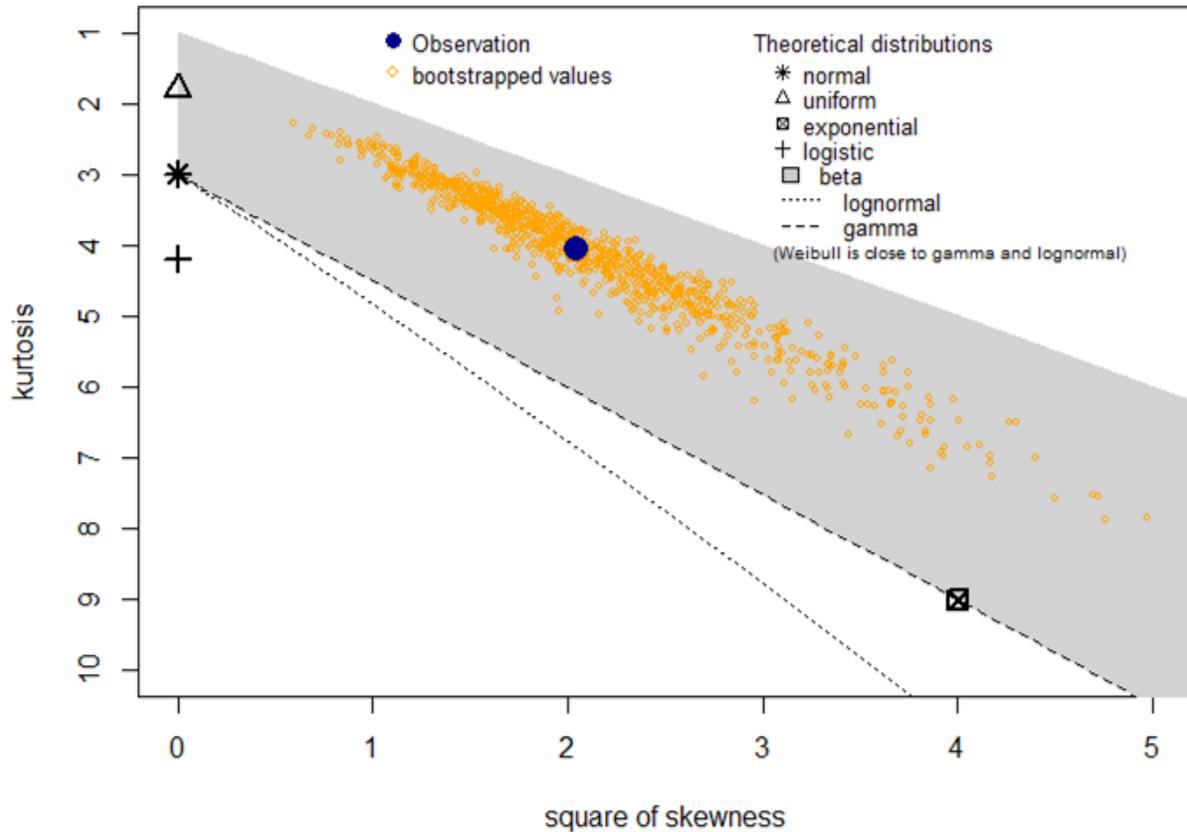
Histogramme 22 : Ajustement du modèle de distribution retenu pour le DBH des mangroves de Mamboumba Rivière



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Le test graphique de Cullen et Frey a diagnostiqué les distributions Weibull, Gamma et Log-normale comme distribution potentielle. Les coefficients de Skewness de 1,43 et 4,04 de Kurtosis manifestent respectivement une asymétrie à droite et une forme leptokurtique à longue queue. Les données empiriques se superposent au centre de l'échantillonnage aléatoire généré à 10000 tentatives (Figure 50, ci-après).

Figure 49: Choix du modèle de distribution des DBH de Mamboumba rivière selon Cullen et Frey

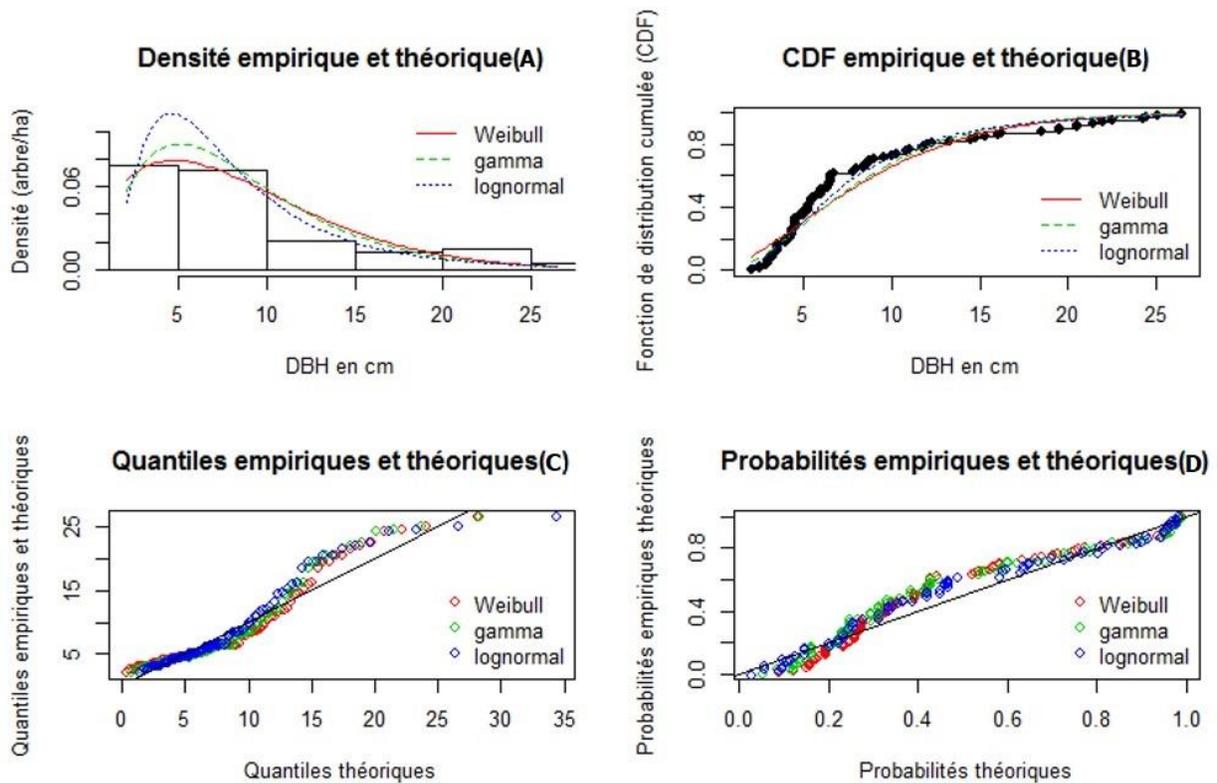


Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

La distribution Log-normale semble la mieux ajustée selon la figure 1 du Graphique 6, ci-après. En effet, les trois distributions ont une allure identique, néanmoins la distribution Log-normale semble la meilleure s'agissant de l'intervalle de 10 à 15 cm. Cette situation est confirmée par la fonction de distribution cumulative où un léger décalage est observable entre la distribution empirique et les distributions théoriques au niveau des valeurs de 0,3 et 0,4 de distribution cumulative (Figure B du Graphique 6, ci-après). Toutefois, la distribution Log-normale est celle qui est

plus proche de la distribution empirique. La distribution des quantiles présente des queues de distribution bien ajustée à gauche, tandis que les queues à droite ne le sont pas. De plus, selon Kibet et *al* (2019) les quantiles bien ajustés ont une densité comprise entre 0 et 1. Cette règle est aussi vraie pour la distribution de probabilités théoriques et empiriques (Figure C et D du Graphique 6, ci-après). Les trois distributions ne sont pas bien ajustées au centre, toutefois, la distribution Log-normale est la plus proche des données empiriques. Et comme, la densité de probabilité empirique et probabilité théorique à une plage comprise entre 0 et 1 alors, nous considérons que la distribution Log-normale a un ajustement raisonnable.

Graphique 6: Appréciation du modèle de distribution de DBH des mangroves de Mam-boumba rivière



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Les tests statistiques classiques d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von Mises et Anderson-Darling réalisé sur les trois distributions de probabilité à un niveau de signification de 95% ont indiqué la distribution Log-normale comme étant la meilleure. En effet, pour les trois tests la distribution Log-normale est la meilleure suivie de la distribution Gamma (Tableau 26, ci-après). De plus, le critère de pénalisation AIC et BIC sont respectivement de 551,62 et 556,73 pour

les distributions Log-normale et 565,15 et 570,25 pour la distribution Gamma. Ces tests viennent confirmer que la distribution Log-normale est celle qui ajuste au mieux les mangroves de Mamboumba rivière.

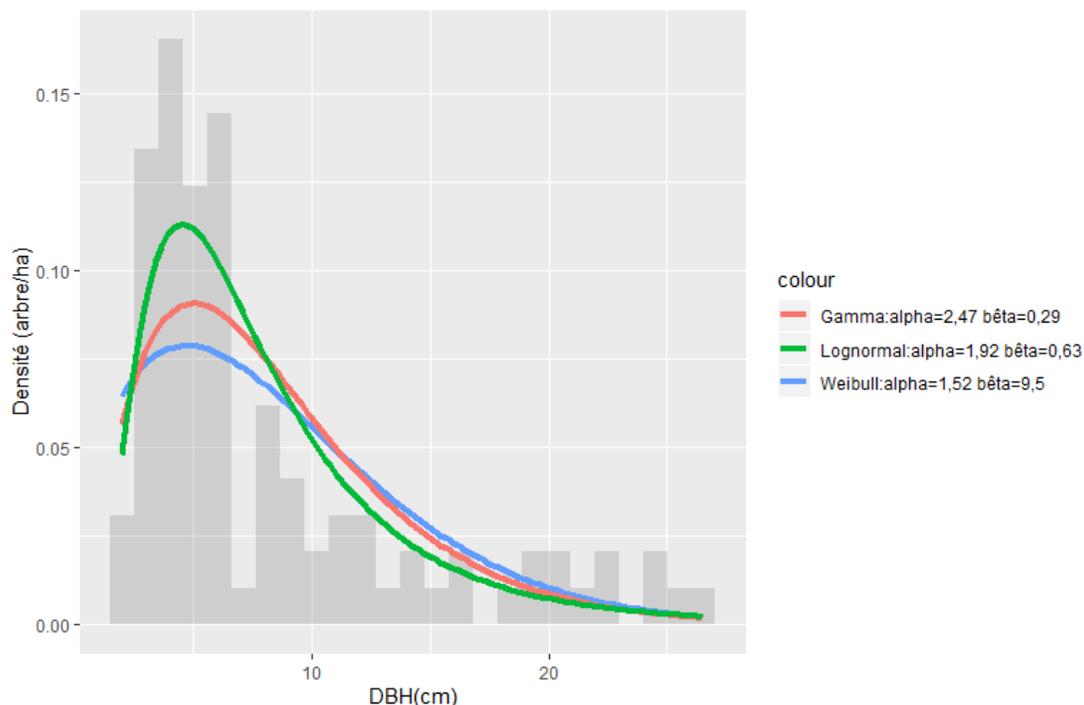
Tableau 26 : Modèle de distribution ajusté des mangroves de Mamboumba Rivière et leurs critères d'appréciation

Distribution de probabilité	Critère			Anderson-Darling	Critère		
	d'information d'Akaike (AIC)	Kolmogorov-Smirnov	Cramer-von Mises		d'information bayésien (BIC)	α	β
Weibull	574,39	0,18	0,61	3,58	579,5	1,52	9,5
Gamma	565,15	0,18	0,55	3,14	570,25	2,47	0,29
Lognormal	551,62	0,14	0,28	1,7	556,73	1,92	0,63

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Le coefficient α de la distribution Log-normale est de 1,92 donc compris entre $1 < \alpha < 3,6$ donc caractéristique d'une distribution asymétrique positive à peuplement monospécifique à prédominance relative d'individu à petit DBH. Les coefficients α de Gamma et Weibull sont respectivement de 2,42 et 1,92. Cela explique la superposition et le croisement de courbes (Histogramme 23, ci-après).

Histogramme 23 : Allure générale des courbes de distribution de DBH pour Mamboumba rivière

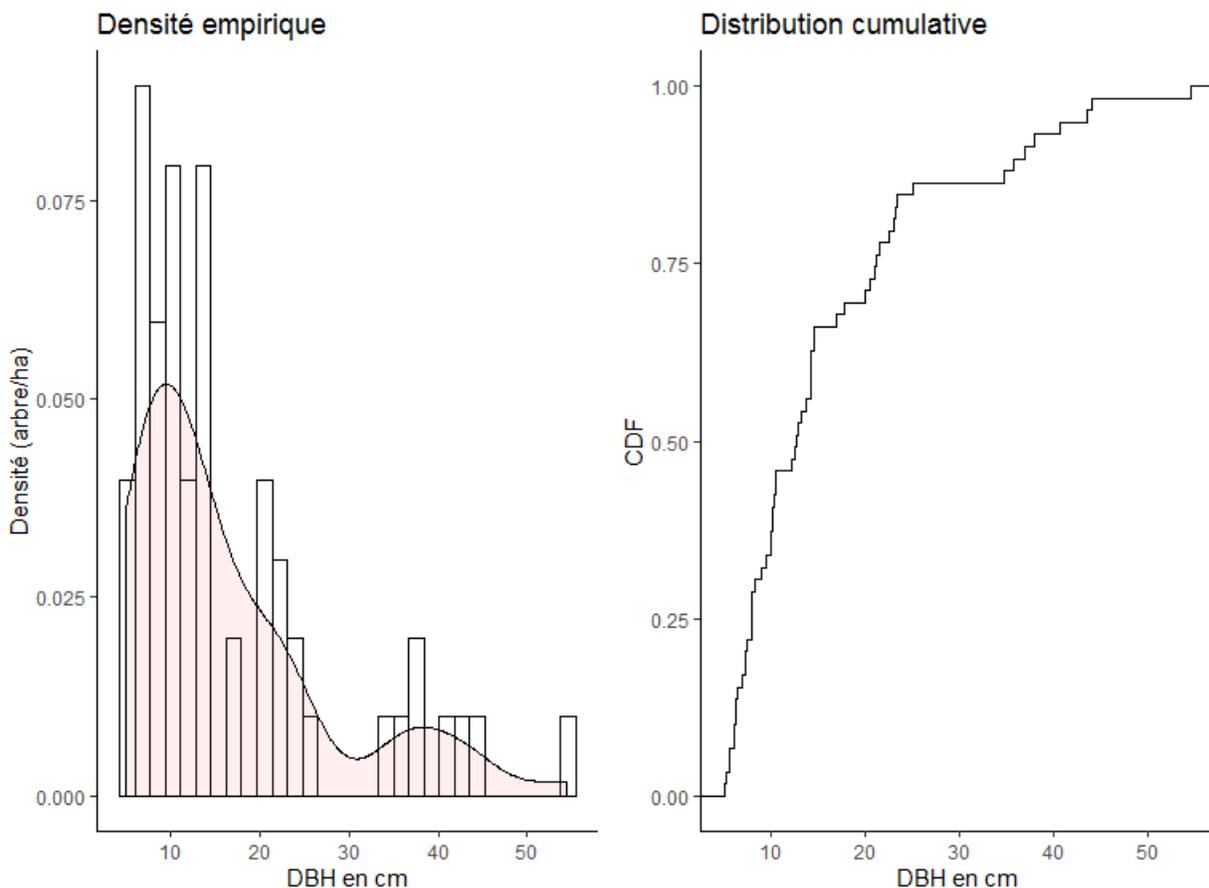


Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

2.2.5. Moka

Le DBH des mangroves de Moka est compris entre 5 et 54,5 cm de DBH. La moyenne et la médiane sont respectivement de $16,24 \pm 1,49$ et de 12,7 cm de DBH. Entre 5 et 10 cm de DBH la densité varie respectivement de 3, 9 et 6 arbres par hectare. Par contre, de 10 à 15 cm la densité oscille entre 8, 3 et 8 arbres par hectare respectivement. D'une manière générale, on observe deux grandes lacunes et trois grands pics. En effet, le premier pic se situe dans la tranche 5 à 15, le second entre 20 et 25 et le troisième se situe entre 33 et 38. Les lacunes sont observées entre 26 et 32 et 45 et 54 cm de DBH. Ces lacunes sont mises en évidence sur la courbe de distribution cumulative à travers deux paliers qui marquent l'interruption de l'allure croissante de la courbe cumulative (Histogramme 24, ci-après).

Histogramme 24 : Ajustement du modèle de distribution retenu pour le DBH des mangroves de Moka

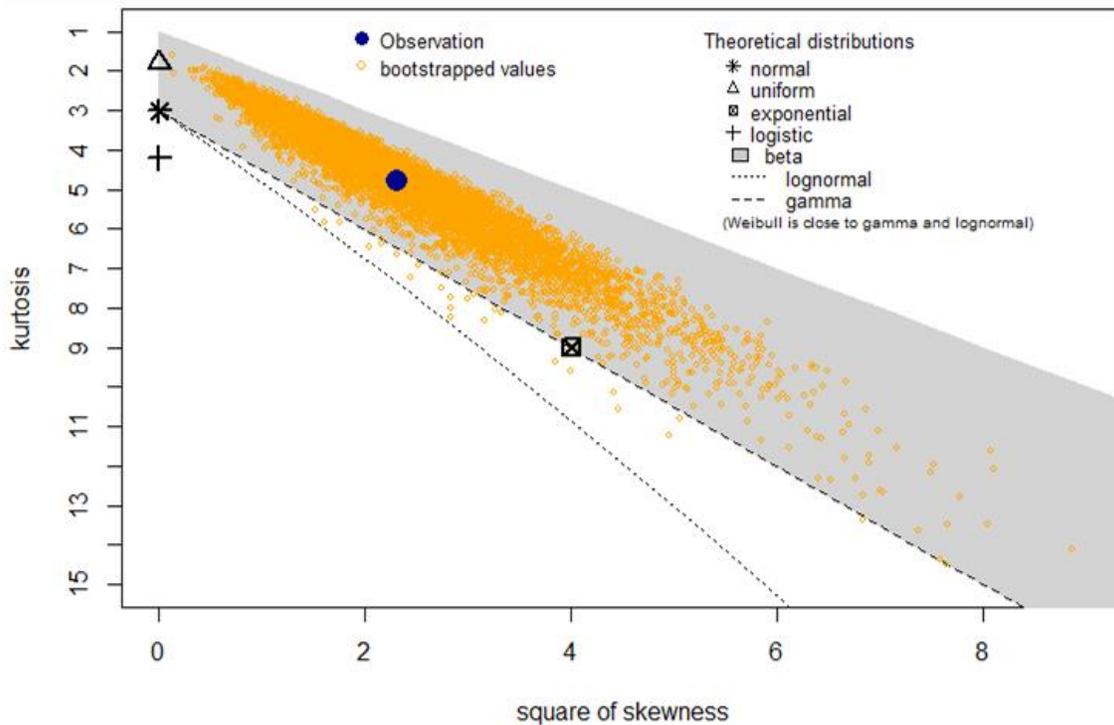


Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Ayant un Skewness de 0, les distributions normales, uniformes, logistiques et exponentielles sont écartées des distributions potentielles. Ainsi, comme distribution potentielle il reste plus que

les distributions Gamma, Weibull et la distribution Log-normale. Les données empiriques en bleu se superposent aux données en jaune aléatoirement simulées à 10000 tentatives. Ainsi, les données obéissent à une forme leptokurtique à longue queue avec un coefficient de Kurtosis de 4,77 et un coefficient de Skewness de 1,51 donc asymétrique à droite (Figure 51, ci-après).

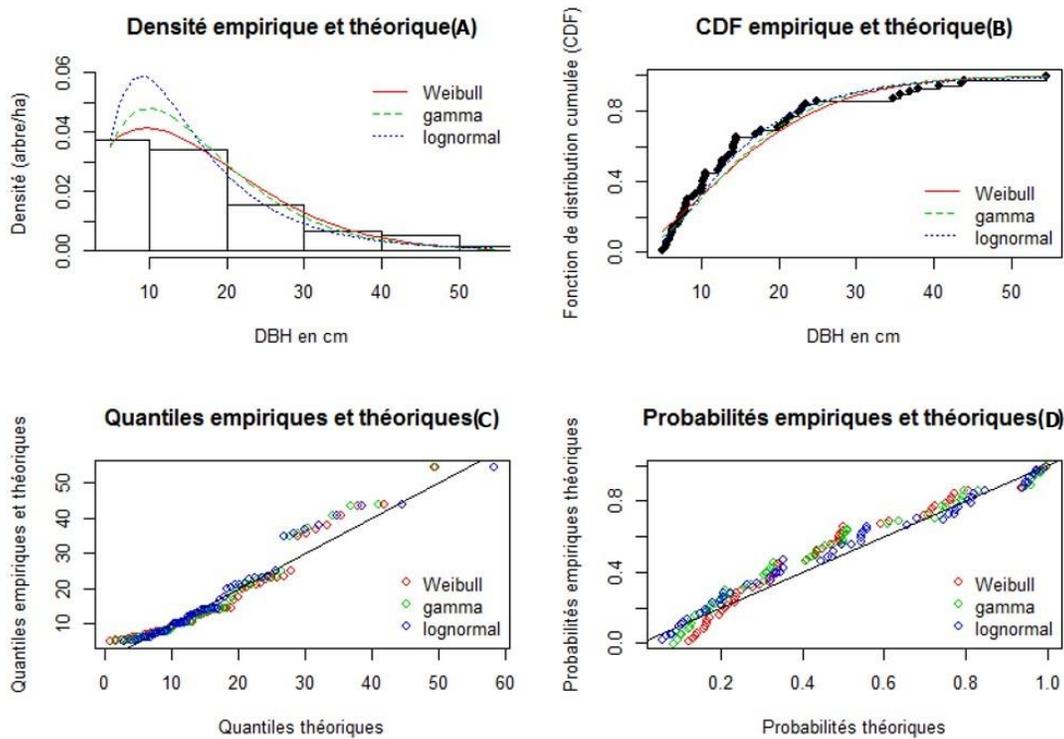
Figure 50: Choix du modèle de distribution des DBH de Moka selon Cullen et Frey



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Au regard des densités de distributions empiriques et théoriques la distribution Log-normale est la plus proche du diagramme de distribution suivie de la distribution Gamma. Il en est de même dans la distribution des densités cumulatives où l'écart entre de la distribution Weibull est nette entre 10 et 25 cm de DBH. Aussi, la longueur de la queue gauche de la distribution Weibull est plus courte que celles des distributions Gamma et Log-normale. Les queues sont tout de même acceptables à gauche ce qui n'est pas le cas à droite où seul quelque point de Log-normale sont plus proche de la droite de comparaison. Le centre de la distribution n'est pas bien ajusté pour l'ensemble de distribution. Toutefois, la distribution Log-normale est plus des données. Au final, la distribution la mieux ajustée est la distribution Log-normale (Figures A à D du Graphique 8, ci-après).

Graphique 8: Appréciation du modèle de distribution de DBH des mangroves de Moka



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Les critères d’information AIC des distributions Weibull, Gamma et Log-normale sont 433,18 ; 427,37 et 419,97 chacune. Il ressort que la distribution Log-normale a le plus petit AIC. Il en est de même des coefficients test de Kolmogorov-Smirnov, Cramer-Von Mises et du test d’Anderson Darling. Par conséquent, la distribution Log-normale est celle qui s’ajuste le mieux aux mangroves de Moka (Tableau 27 et Histogramme 25, ci-après).

Tableau 27 : Modèle de distribution ajusté des mangroves de Moka et leurs critères d’appréciation

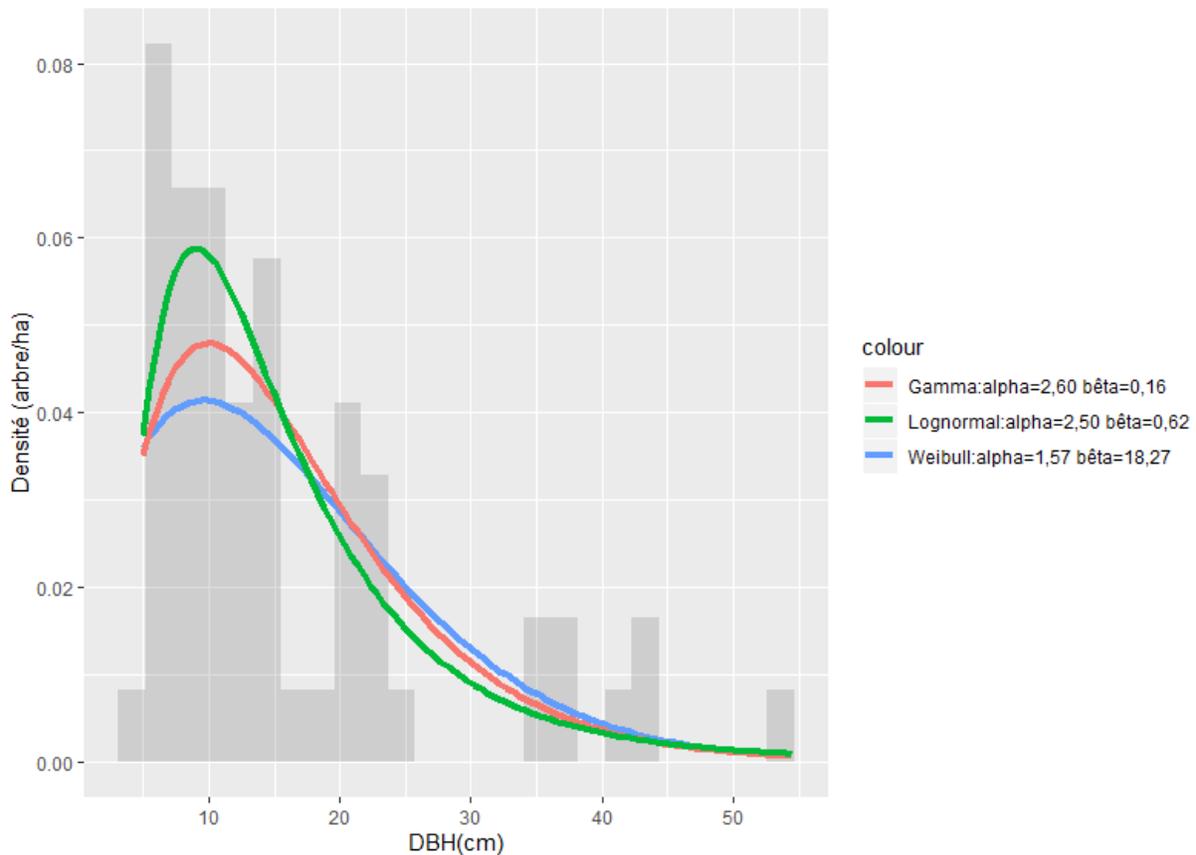
Distribution de probabilité	Critère d’information d’Akaïke (AIC)	Critère			Critère d’information bayésien (BIC)	α	β
		Kolmogorov-Smirnov	Cramer-von Mises	Anderson-Darling			
Weibull	433,18	0,16	0,26	1,71	437,34	1,57	18,27
Gamma	427,37	0,14	0,21	1,41	431,52	2,60	0,16
Lognormal	419,97	0,10	0,10	0,75	424,13	2,50	0,62

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Les coefficients α des distributions Log-normale et Gamma naturellement la mieux ajusté et celle qui la seconde sont de 2,5 et 2,6, donc comprises entre 1 et 3,6. A priori, cela témoigne d’une

structure asymétrique à droite à prédominance relative d'individu jeune à petit DBH (Husch et *al.*, 2003).

Histogramme 25 : Allure générale des courbes de distribution de DBH pour Moka



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

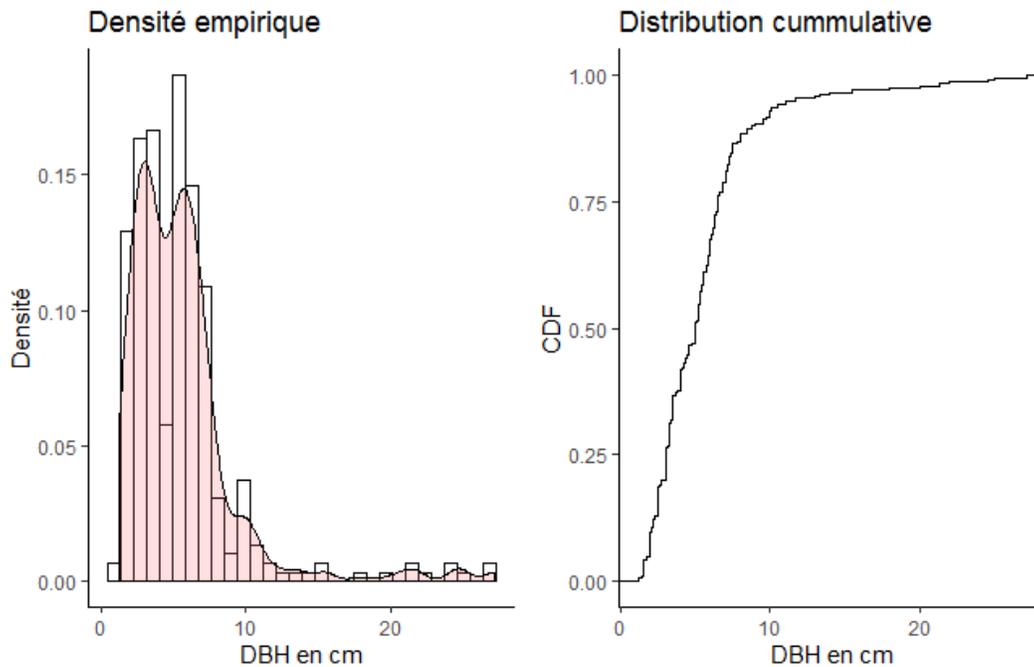
Toutefois, la présence des calibres de 40 et plus de 50 cm de DBH ainsi que de lacune dans les classes de gros calibres laissent penser à une intrusion exogène. Vu que le site de Moka abritait un ancien village, nous émettons l'hypothèse d'une exploitation de gros individus par le passé.

2.3. Estuaire du Rio Mouni

Avec un DBH compris entre 1,2 et 27,2 cm, une moyenne de 5,42 cm, une médiane de 5 et un Skewness de 2,99 Cocobaech a une distribution asymétrique à droite. Au calibre de 1,2 cm la densité est d'environ 1 un arbre à l'hectare. À partir de 2, 3 et 4 cm de DBH Cocobaech les densités sont respectivement de 12 17 et 18 arbres à l'hectare, tandis qu'à 5, 6 ,7 et 8 cm de calibre les densités par hectare sont de 6, 19, 14 et 11 arbres. Et au-delà de 10 cm de DBH le nombre d'arbre ne dépasse plus 3 individus par hectare. Cela vient à dire qu'au niveau de Cocobaech la densité est plus élevée chez les individus de petit diamètre (DBH). De même, la fonction de distribution

cumulative amorce un plateau au-delà de 10 cm. Cela veut dire que même en multipliant les efforts d'échantillonnage l'observation d'une structure contraire relèvera d'un fait rare. Il reste à déterminer la distribution qui ajuste le mieux ces mangroves de Cocobeach (Histogramme 26, ci-après).

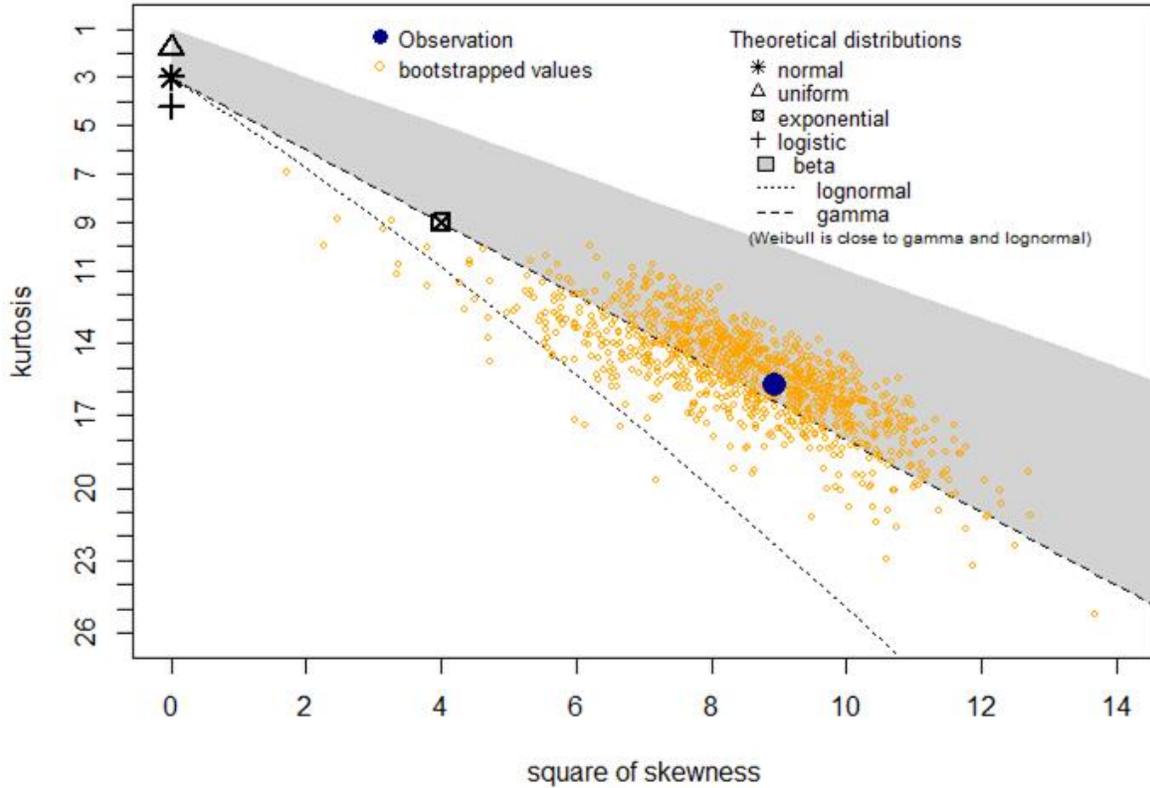
Histogramme 26 : Ajustement du modèle de distribution retenu pour le DBH des mangroves de Cocobeach



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

D'après le test graphique de Cullen et Fray les distributions normales, uniformes et logistiques sont en conflit de symétrie parfaite à coefficient de 0 Skewness, or les données empiriques ici sont à un coefficient de 2,99 Skewness. La distribution exponentielle quant à elle a un coefficient Skewness de 4. Au final, la distribution normale, la distribution uniforme, la distribution logistique et la distribution exponentielle ne peuvent pas ajuster le DBH en des mangroves de Cocobeach. Ainsi, les distributions potentielles restantes ne sont autres que Weibull, Gamma et Log-normale (Figure 52, ci-après). Il reste à évaluer laquelle de celle-ci ajuste mieux le DBH des mangroves de Cocobeach.

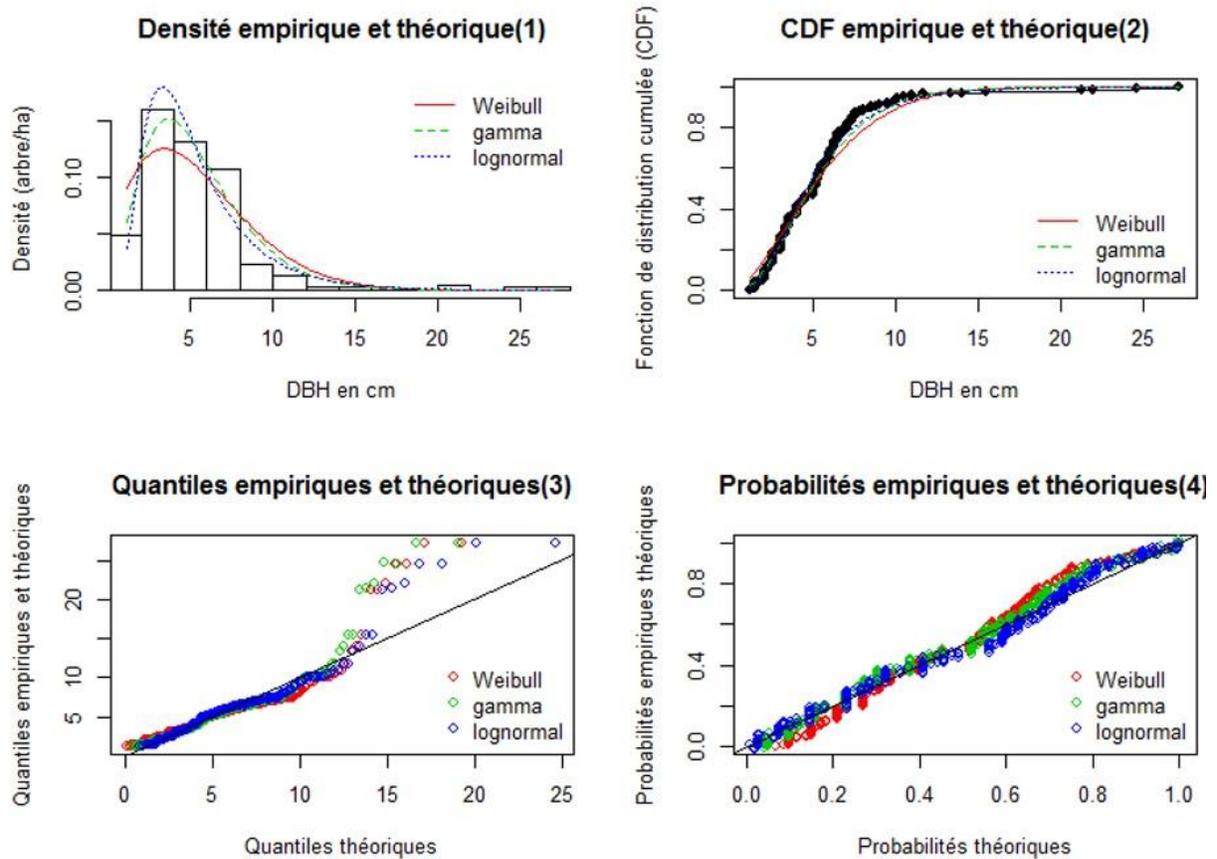
Figure 51: Choix du modèle de distribution des DBH de Cocobeach selon Cullen et Frey



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Le croisement des densités théoriques et empiriques confirme une abondance élevée entre 1 et 10 cm de DBH. Aussi, la courbe de la distribution Log-normale semble mieux suivre l'allure de l'histogramme par rapport à celles des distributions Weibull et Gamma. De plus, la fonction cumulative de la distribution Weibull est plus éloignée de distribution empirique dans l'intervalle [6 et 10] en comparaison à la distribution de Gamma et Log-normale; or, celle-ci fait partie de la plage ayant le plus d'individu. Alors, la distribution de Weibull n'est pas plus apte à ajuster le DBH des mangroves de Cocobeach. Par ailleurs, les queues du croisement de quantiles théoriques et empiriques s'ajustent bien à gauche, tandis que vers la droite seule la distribution Log-normale est plus proche de l'axe d'ajustement. Les données sont bien ajustées au centre pour l'ensemble des distributions. Toutefois, le spectre de la distribution de Weibull est moins présent que ceux des distributions de Gamma et Log-normale. Aussi, le spectre de la distribution Log-normale prédomine par rapport à celui de Gamma. Ceci étant, la distribution Log-normale est celle qui ajuste au mieux le DBH de mangrove de Cocobeach (Figures 1, 2,3 et 4 du Graphique 7, ci-après).

Graphique 7 : Appréciation du modèle de distribution de DBH des mangroves de Cocobeach



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Le critère d'information AIC de l'ensemble de distribution varie entre 1511,75 et 1592,27 ; tandis que celui de BIC est situé entre 1529,27 et 1599,79. Les plus petits des deux critères sont enregistrés par la distribution Log-normale et Gamma soit, 1511,75 et 1519,27 pour la première et 1544,29 de AIC et 1551,81 de BIC pour la seconde. Ayant les plus petits critères d'information alors la distribution Log-normale est celle qui ajuste au mieux le DBH des mangroves de Cocobeach. Les tests classiques de Kolmogorov-Smirnov, Cramer-Von Mises et Anderson-Darling identifient également la distribution Log-normale comme la mieux indiquée pour les mangroves de Cocobeach. Par ailleurs, le coefficient α la distribution Log-normale est comprise entre 1 et 3,6 ; et le coefficient α de Gamma est de 3,08 avec des courbes de distribution très proche (Tableau 28 et Histogramme, 23 ci-après).

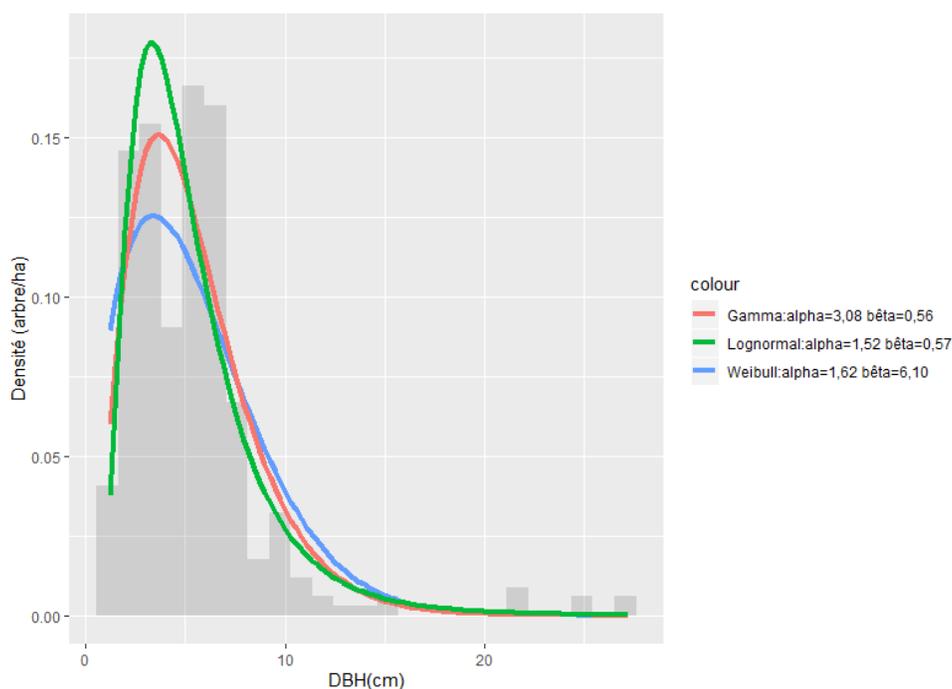
Tableau 28 : Modèle de distribution ajusté des mangroves de Cocobeach et leurs critères d'appréciation

Distribution de probabilité	Critère				Critère		
	d'information d'Akaike (AIC)	Kolmogorov-Smirnov	Cramer-von Mises	Anderson-Darling	d'information bayésien (BIC)	α	β
Weibull	1592,27	0,12	0,95	7,30	1599,79	1,62	6,10
Gamma	1544,29	0,09	0,37	2,96	1551,81	3,08	0,56
Lognormal	1511,75	0,09	0,31	1,87	1519,27	1,51	0,57

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Cela est caractéristique d'un site plurispécifique avec une prédominance relative d'individu à faible DBH. En effet, sur 317 individus échantillonnés aucun d'arbres de DBH ≥ 30 cm n'a été recensé. Et comme Cocobeach est un site plurispécifique cette condition d'individu de faible de DBH ne saurait être attribuée à la caractéristique des espèces. Les hypothèses des conditions écologiques du milieu ou d'équilibre climacique restent les plus plausibles (Histogramme 27, ci-après).

Histogramme 27 : Allure générale des courbes de distribution de DBH pour Cocobeach



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

De manière générale, dès 5 distributions testées : la distribution Gamma, la distribution normale, la distribution Log-normale, la distribution exponentielle et la distribution Weibull, deux

d'entre-elles ajustent le DBH des mangroves estuariennes du Gabon. Il s'agit de la distribution Gamma pour la Remboué, et de la distribution Log-normale pour tous les autres sites. Toutefois, il y a lieu de souligner que dans les sites Alénakiri, Essassa, Mamboumba rivière, Moka, Cocobeach et Oveng la distribution Log-normale est suivie par la distribution Gamma. Par contre, dans la Remboué et à Mamboumba village les distributions Gamma et Log-normale sont respectivement suivies par la distribution Log-normale et la distribution Weibull.

CHAPITRE VI: Les Facteurs de distribution spatiale de biomasse et de carbone des mangroves

Les conditions du milieu traduites par les variables physico-chimiques des mangroves serviront dans la compréhension de la répartition spatiale de la biomasse et partant du carbone des mangroves. Cela permettra certainement de comprendre, d'une part, pourquoi certains sites sont pourvus des individus à gros DBH et grandes hauteurs et d'autres en sont dépourvus et, d'autre part, Pourquoi certaines régions sont monodominantes et d'autres plurispécifiques. En bref, il est question de mettre en relief les préférences écologiques de chaque espèce et les facteurs qui en sont les causes de celle-ci et de leurs capacités de stockage de biomasse et de carbone.

1. Environnement des mangroves

1.1. Les paramètres physico-chimiques

Au total, 66 % de site ont bénéficié d'un prélèvement de paramètre physico-chimique soit, 10/15 de sites et 60/90 de placettes.

- Estuaire du Komo

Dans l'estuaire du Komo les paramètres physico-chimiques ont été prélevés dans trois sites: Alénakiri, Donguila et Matek. La température dans cet estuaire varie entre 27,03 C° et 30 C° soit, une moyenne de 28,34 C°. La pression atmosphérique oscille entre 1012 mb et 1013,833 mb avec 1012,67 mb de pression moyenne. Le potentiel d'hydrogène (pH) est essentiellement acide et gravite autour de 6,22 et 6,58 avec une moyenne de 6,44. Le pHmV quant à lui fluctue autour de 7,68 et 26,62 soit, une moyenne 15,06. L'oxygène dissous et les cations échangeables varient respectivement entre 3,05 (% sat) et 14,61 (% sat) pour le premier et entre 30964,6 (µS/cm) et 41712,67 (µS/cm) pour le second soit, des moyennes respectives de 7,01 (% sat) et 35726,3 (µS/cm). La salinité tourne entre 19,68 (ppt) et 26,76 (ppt) soit, une moyenne de 22,73 (ppt). L'altitude quant à elle est essentiellement positive, mais reste très faible avec une moyenne de 5,28 m et maximum de 14,33 m et un minimum de 1 m (Tableau 29, ci-dessous).

- Estuaire de la Mondah

Les paramètres physico-chimiques de l'estuaire de la Mondah ont été prélevés sur cinq sites: Alibandeng, Bolokouboué, Essassa, Mamboumba et Oveng. Les températures de Mondah oscillent entre 26,51 C° et 28,2 C° soit, une de 27,57 C°. Les pressions osmotiques cumulent à 1013,04 mb de pression moyenne et gravitent entre 1009,86 mb et 1015 mb. Comme l'estuaire du Komo, le potentiel d'hydrogène (pH) dans l'estuaire de la Mondah est essentiellement acide avec une moyenne de 6,43 un amplitude de 0,55. Le pHmV et l'oxygène dissous et les cations échangeables ont respectivement 16,59 ; 15,76 (% sat) et 35257 (µS/cm) de moyenne. La salinité enregistre une amplitude de 28,14 (ppt) avec une moyenne de 22,56 (ppt) pour l'ensemble de site de la Mondah. L'altitude dans l'estuaire de la Mondah est également positive avec une moyenne de 6,93 m avec un maximum de 9,86 m et un minimum de 4 m (Tableau 29, ci-après).

Tableau 29 : Paramètres physico-chimiques des mangroves estuariennes par site

	Température	Pression	pH	pHmV	Oxygène dissous	Cation échangeable	Salinité	Altitude	Estuaire	Localisation	Taille
DONGUILA	27.98	1013.83	6.523	10.867	3.05	41712.67	26.76	14.33	Komo	Méso mangrove	Grande
MATEK	27.03	1012.17	6.578	7.683	14.617	34501.5	21.76	0.5	Komo	Front de mer	Petite
ALENAKIRI	30	1012	6.224	26.62	3.36	30964.6	19.68	1	Komo	Arrière mangrove	Petite
TOTAL	85.02	3038.00	19.33	45.17	21.03	107178.77	68.20	15.83			
MOYENNE	28.34	1012.67	6.44	15.06	7.01	35726.3	22.73	5.28			
MAMBOUMBA Riv.	27.23	1013.33	5.96	44.57	21.8	45122	29.29	0	Mondah	Arrière mangrove	Grande
BOLOKOUBOUE	26.51	1009.86	6.72	0	5.4	7815	4.48	9.86	Mondah	Front de mer	Grande
OVENG	28.2	1015	6.59	7.1	21.8	37942	24.04	0	Mondah	Arrière mangrove	Petite
ESSASSA	27.7	1012	6.41	17.4	21.8	49881	32.62	4	Mondah	Méso mangrove	Petite
ALIBANDENG	28.1	1015	6.47	13.9	8	35525	22.39	0	Mondah	Arrière mangrove	Petite
TOTAL	137.74	5065.19	32.15	82.97	78.80	176285	112.82	13.86			
MOYENNE	27.55	1013.04	6.43	16.59	15.76	35257	22.56	6.93			

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

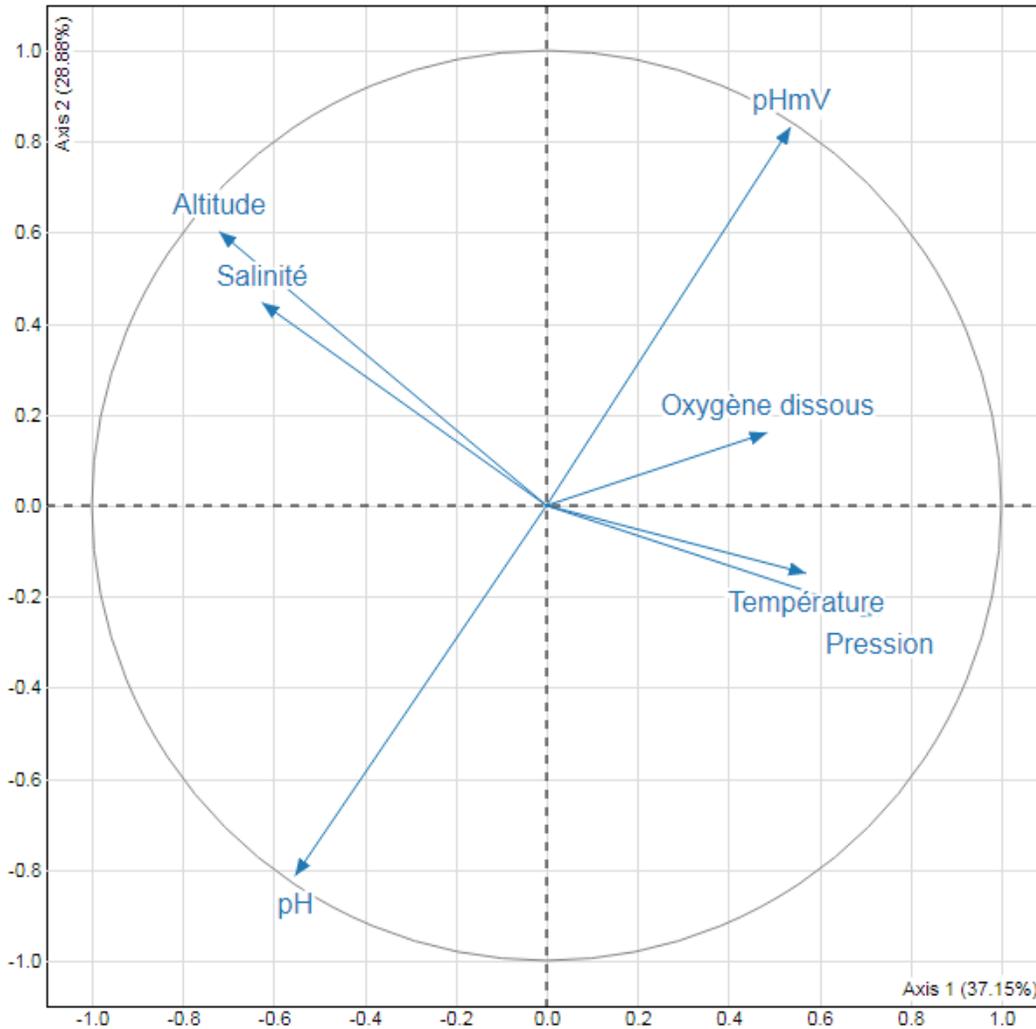
1.2. Analyse globale des variables environnementale

- Interactions des variables environnementales entre-elles.

La première dimension met en exergue deux groupes : d'un côté il y'a l'altitude, la pression, le pH et la température qui sont corrélés et l'oxygène dissous. Ce groupe est en opposition avec le regroupement de la salinité, les cations échangeables et le pHmV. L'axe de la deuxième dimension isole d'un côté l'oxygène dissous altitude, la salinité et les cations échangeable et de l'autre côté le pH, la pression, la température et pHmV. Dans le premier axe le pH contribue à 15,31% avec un cosinus² de 98%. Les cations échangeables ont une contribution de 15,27 et un cosinus² de 98%.

La pression et la température ont respectivement 15,19% et 15,01% de contribution et 97% et 96 de \cos^2 . Ils sont alors représentatifs de la première dimension. Par contre, le deuxième axe est mieux représenté par l’oxygène dissous qui a 84,39% de contribution dans la formation de l’axe et a un \cos^2 de 81% d’où leur superposition au cercle de corrélation de l’analyse en composante principale (ACP) (Figure 52, ci-après).

Figure 52: carte factorielle des paramètres physico-chimiques des mangroves estuariennes



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Des fortes corrélations sont mises en évidence pour l’ensemble des variables dans leurs groupes respectifs excepté les variables altitudes et pHmV dont les flèches ne touchent pas cercle de corrélation. La première dimension regroupe 80,41% d’inertie de la variance expliquée. La

deuxième dimension cumule 12,07% d'inertie de la variance expliquées soit, un total d'environ 92,48% de la variance totale. Ces deux axes sont largement suffisants pour l'analyse, car ils regroupent à eux seuls 92,48% de l'information initiale.

- Structuration biogéographique des sites en fonction des variables environnementales

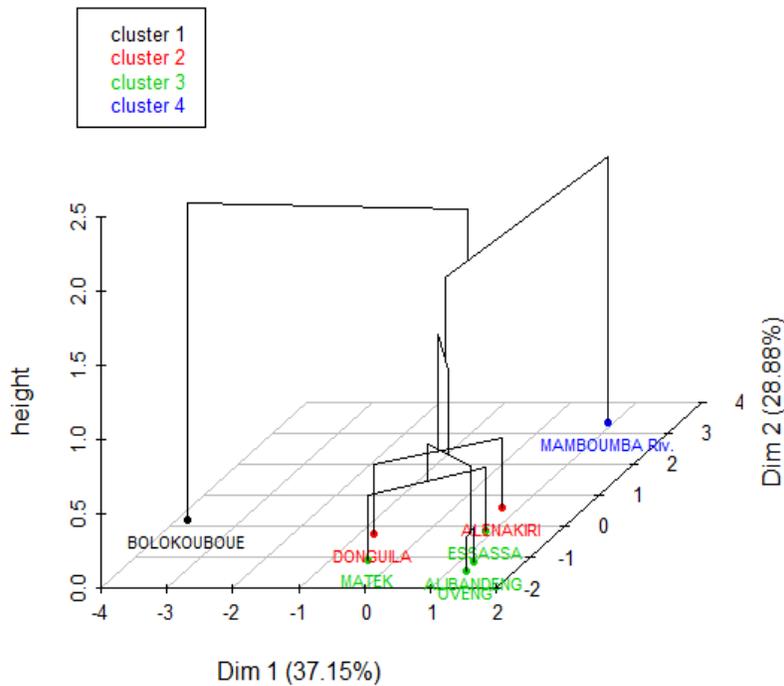
L'examen du plan factoriel des sites statistiquement appelé individu fait ressortir d'une part dans son premier axe une opposition entre Mamboumba rivière, Alénakiri, Essassa, Alibandeng Oveng d'un côté et Bolokouboué, Donguila et Matek de l'autre côté. Son second axe est marqué par une opposition entre Mamboumba rivière, Alénakiri, Bolokouboué d'un côté et Donguila, Oveng, Essassa et Matek de l'autre côté. Bolokouboué contribue à 85,34% du premier axe avec un cosinus² de 99%, tandis que Mamboumba, Essassa et Alibandeng ont respectivement des cosinus² de 64% pour chacun des deux premiers et 60% pour le dernier. Dans le second axe c'est plutôt Oveng, Matek et Donguila qui sont caractéristiques avec respectivement 73% ; 50% et 66%. Ainsi donc, Bolokouboué qui est pourtant dans le même cadre géographique que Mamboumba rivière, Oveng, Essassa et Alibandeng parce qu'appartenant au même estuaire se retrouve d'un point de vue biogéographique éloigné. De même, Alénakiri Donguila et Alibandeng qui sont géographiquement éloignés sont d'un point de vue biogéographique très proche. Toutefois, la classe 1 Matek constitue le parangon du groupe, c'est le site qui reflète au mieux la moyenne des différentes variables pour l'ensemble du groupe. Cela revient à dire que les paramètres physico-chimiques dans les mangroves d'Oveng, Mamboumba rivière et Essassa sont semblables aux paramètres physico-chimique des mangroves de Matek. Dans le groupe 2 la moyenne des paramètres physico-chimique des mangroves de l'ensemble des sites est traduite par les valeurs des paramètres physico-chimiques de Donguila. Naturellement Bolokouboué est son propre reflet vu que ce groupe est singleton. Toutefois, le site le plus caractéristique du du groupe 1 est Oveng est biogéographique le plus éloigné du centre de gravité des classes. Celui du groupe 2 reste Donguila et Bolokouboué pour le groupe 3 (Figures 53 et 54, ci-après). La situation singulière de Bolokouboué qui n'est pas semblable aux autres sites peut s'expliquer par deux faits : soit la structure biogéographique est perturbée par un élément extérieur, soit nous sommes en présence d'une structure biogéographique atypique. Le croisement des conditions du milieu avec la structure géographique et biologique nous en dira plus.

Figure 53: Regroupement des sites des mangroves en fonction des variables environnementales vue en 2 dimensions



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Figure 54: Dendrogramme des sites des mangroves en fonction des variables environnementales vues en 3 dimensions



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Globalement pour l'ensemble des variables exceptées pHmV, il existe une liaison forte entre les variables et l'ensemble de classe. En effet, les cations échangeables ont un coefficient de corrélation de 0,99 suivi de la pression et le pH avec 0,97 chacun. Ensuite, viennent respectivement la température (0,96), la salinité (0,95), l'altitude (0,95) et l'oxygène dissous 0,82 de rapport de corrélation. Les variables de la classe 1 ne prennent pas des valeurs significativement inférieurs ou significativement élevées pour l'ensemble des individus. Dans la classe 2, l'oxygène dissous est significativement plus petit que la moyenne pour l'ensemble des individus, avec une valeur test (v.test) négative (-2,315). Par contre, dans la classe 3, la pression, le pH, la température et l'altitude sont significativement élevés par rapport à la moyenne des individus. Par contre, le pHmV, la salinité et les cations échangeables sont significativement inférieurs à la moyenne pour l'ensemble des individus.

2. Mangroves estuariennes du Gabon

2.1. L'abondance

- Komo

L'estuaire du Komo totalise 1050 taxons soit, 40,76% des effectifs totaux et compte 30 placettes. Remboué a 14,44% d'abondance suivi de Matek qui cumule 14,25%. Alénakiri, Chinchoua et Donguila détiennent respectivement 7,6%, 4,15% et 1,39%. Les espèces rencontrées sont *Rhizophora racemosa* avec 61,81 %, *Rhizophora harrisonii* qui a 4,15 % suivi par *Avicennia germinans* avec 4,29 %. Les familles *Rhizophoraceae* et *Verbenaceae* sont les plus abondantes ainsi que des genres *Rhizophora* et *Avicennia* (Tableau 30, ci-après).

- Mondah

L'estuaire de la Mondah quant à lui totalise 1268 taxons soit, 49,22 % de l'effectif total. Oveng représente 14,16 % des abondances totales, suivi de Bolokouboué avec 9,70 % d'abondance et Essassa avec 7,88 % d'abondance. Viennent ensuite Alibandeng, Mamboumba village et Mamboumba rivière sans oublier Moka avec respectivement 5,39 % ; 5,16%, 4,15 % et enfin 2,75 %. Le regroupement de placette révèle la présence de 5 espèces. Il s'agit de *Rhizophora racemosa* qui

représente 56,70 %, *Rhizophora harrisonii* avec 33,90 %, *Laguncularia racemosa* qui a 2,37%, *Phœnix reclinata* qui a 2,37 % suivi de *Avicennia germinans* et *Conocarpus erectus* avec respectivement 4,29 % et 1,18 %. Les familles *Rhizophoraceae*, *Combretaceae*, *Verbenaceae* et *Arecaceae* ainsi que les genres *Rhizophora*, *Conocarpus*, *Laguncularia*, *Avicennia* et *Phœnix* sont fréquemment rencontrées (Tableau 30, ci-après).

▪ Rio Mouni

Le Rio Mouni totalise 258 taxons au seul site de Cocobeach. Il a la particularité regrouper dans chacune de ses placettes toutes les espèces inventoriées dans les estuaires Komo et Mondah. L'espèce la plus représentée est *Rhizophora racemosa* avec 35,27 % d'abondance. Elle est suivie d'*Avicennia germinans* qui 20,54 % d'abondance ainsi que de *Laguncularia racemosa* avec 19,77 %. Ensuite viennent *Conocarpus erectus* qui totalise 9,69 % d'abondance suivi respectivement de *Phœnix reclinata* avec 7,75 % et *Rhizophora harrisonii* qui a 6,98 %. Tout comme dans l'estuaire de la Mondah, les familles *Rhizophoraceae*, *Combretaceae*, *Verbenaceae* et *Arecaceae* ainsi que les genres *Rhizophora*, *Conocarpus*, *Laguncularia*, *Avicennia* et *Phœnix* y sont fréquemment rencontrées, mais avec la spécificité de les retrouver dans chacune des placettes (Tableau 30, ci-après).

Tableau 30 : Abondance des mangroves estuariennes pour l'ensemble des sites

	<i>Rhizophora racemosa</i>	<i>Rhizophora harrisonii</i>	<i>Phœnix reclinata</i>	<i>Laguncularia racemosa</i>	<i>Conocarpus erectus</i>	<i>Avicennia germinans</i>	TOTAL (Ab)	FREQUENCE (%)	AGB	AGC	Estuaire	Localisation	Taille
ALENAKIRI	0	129	0	0	0	39	168	6.522	66.158	33.079	Komo	Arrière mangrove	Petite
CHINCHOUA	107	0	0	0	0	0	107	4.154	333.949	166.974	Komo	Front de mer	Grande
DONGUILA	0	30	0	0	0	6	36	1.398	476.430	238.215	Komo	Méso mangrove	Grande
MATEK MAVI	259	108	0	0	0	0	367	14.247	13.501	6.750	Komo	Front de mer	Petite
REMOUË	283	89	0	0	0	0	372	14.441	620.758	310.379	Komo	Méso mangrove	Grande
MOYENNE	216.33	89	0	0	0	22.5	210	8.152	302.159	151.080			
TOTAL	649	356	0	0	0	45	1050	40.761	1510.795	755.398			
FREQUENCE (%)	61.81	33.90	0	0	0	4.29	100						
ALIBANDENG	0	139	0	0	0	0	139	5.396	4.122	2.061	Mondah	Arrière mangrove	Petite
MAMBOUMBA Vil.	99	0	0	0	0	34	133	5.163	927.137	463.568	Mondah	Arrière mangrove	Grande
MAMBOUMBA Riv.	0	107	0	0	0	0	107	4.154	57.958	28.979	Mondah	Arrière mangrove	Petite
MOKA	38	2	0	0	0	31	71	2.756	48.829	24.415	Mondah	Front de mer	Petite
OVENG	320	0	0	30	15	0	365	14.169	4.382	2.191	Mondah	Arrière mangrove	Petite
ESSASSA	203	0	0	0	0	0	203	7.880	24.175	12.087	Mondah	Méso mangrove	Petite
BOLOKOUBOUE	59	129	30	0	0	32	250	9.705	239.549	119.774	Mondah	Front de mer	Grande
MOYENNE	359.5	65.5	30	30	15	48.5	634	24.612	622.035	311.018			
TOTAL	719	377	30	30	15	97	1268	49.224	1306.150	653.075			
FREQUENCE (%)	56.70	29.73	2.37	2.37	1.18	7.65	100						
COCOBEACH	91	18	20	51	25	53	258	10.016	24.477	12.238	Rio Mouni	Front de mer	Petite
TOTAL	1459	751	50	81	40	195	2576	100	1330.627	665.313			
FREQUENCE (%)	35.27	6.98	7.75	19.77	9.69	20.54	100						
TOTAL				2576									
FREQUENCE (%)	56.64	29.15	1.94	3.14	1.55	7.57	100.00						

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

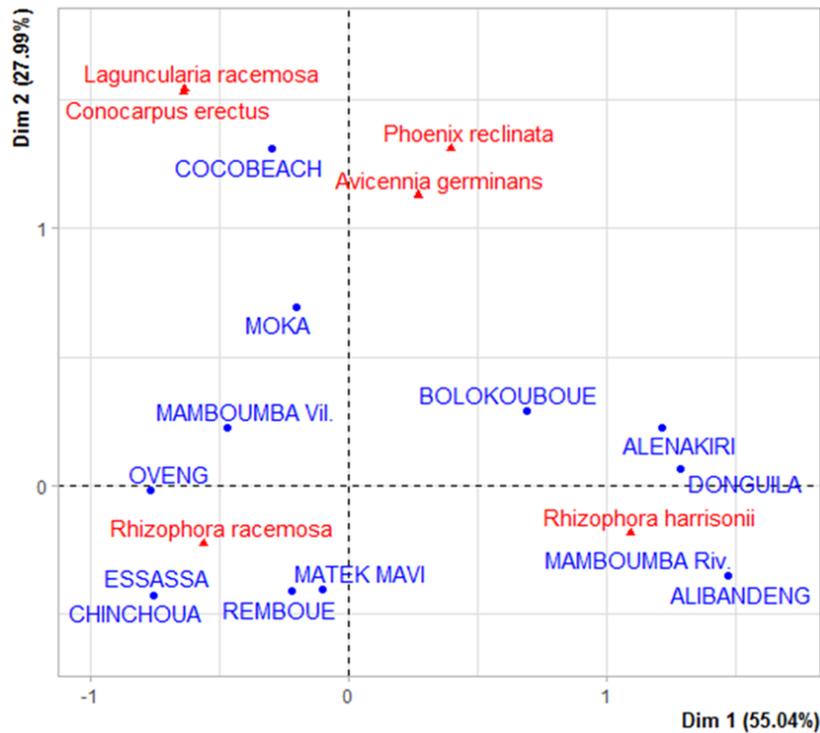
2.2. Structure et organisation du peuplement des mangroves

D'après l'analyse factorielle de correspondance (AFC), l'inertie totale de l'ensemble de données est exprimée à 83,03 % par les deux premières dimensions. Cela indique que 83,03 % de la variabilité totale du nuage de lignes par ce plan. Ce pourcentage est élevé alors le premier plan reflète une portion considérable des données. Cette valeur est nettement supérieure la valeur de référence qui est de 76,69 %. Ce qui veut dire que la variabilité expliquée par ce plan est significative au seuil de 0,95 quantile de la distribution des pourcentages d'inertie obtenue en simulant 444 jeux de données de taille équivalente sur la base d'une distribution uniforme. Cela suggère alors de limiter l'analyse à la description des 2 premiers axes car ils représentent une quantité d'inertie supérieure à celle obtenue par le quantile 0,95 de la distribution aléatoire (83,03 % > 76,69 %).

La première dimension est marquée par l'opposition des sites Alibandeng, Mamboumba Rivière et Alenakiri caractérisé par une coordonnée fortement positive à droite du graphique, sur l'axe aux sites Remboué, Matek Mavi, Essassa et Oveng à gauche du graphique caractérisé par une coordonnée fortement négative sur l'axe. Les sites Alibandeng, Mamboumba Rivière et les sites Alenakiri caractérisés par une coordonnée positive sur l'axe partagent une basse fréquence de *Rhizophora racemosa*. Et les sites Remboué, Matek Mavi, Essassa et Oveng qui se caractérisent par une coordonnée négative sur l'axe partagent une haute fréquence de *Rhizophora racemosa*. À noter que Donguila et *Rhizophora harrisonii* sont fortement corrélés à la dimension (corrélation respective de 0,94, 0,96), ils résument la première dimension.

La deuxième dimension oppose les sites Cocobeach caractérisé par une coordonnée fortement positive sur l'axe en haut du graphique, aux sites Remboué, Matek Mavi, Essassa, Oveng caractérisé par une coordonnée fortement négative sur l'axe en bas du graphique. Cocobeach caractérisé par une coordonnée positive sur l'axe partage une fréquence élevée des *Phoenix reclinata*, *Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erectus* et *Avicennia germinans*. Les sites Remboué, Matek Mavi, Essassa et Oveng caractérisés par une coordonnée négative sur l'axe partagent une haute fréquence de *Rhizophora racemosa*. À noter que les sites Matek Mavi est fortement corrélé à la dimension (corrélation de 0,06) par conséquent ils résument la deuxième dimension (Figure 56, ci-après).

Figure 55: Carte factorielle des espèces et des sites en fonction de l'abondance



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

En somme, la probabilité de rencontrer les espèces *Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erectus*, *Phoenix reclinata* et *Avicennia germinans* au détriment des autres espèces de mangrove est plus élevé à Cocobeach que partout ailleurs. De même, la probabilité de rencontrer *Rhizophora racemosa* est une particularité à Moka, Oveng, Essassa, Mamboumba Village, Matek, Chinchoua et de Remboué. Tout comme *Rhizophora harrisonii* en est une particularité pour Bolokouboué, Alénakiri, Donguila, Mamboumba Rivière et Alibandeng. Les hypothèses de cette structure et organisation sont liées aux facteurs environnementaux et géographiques.

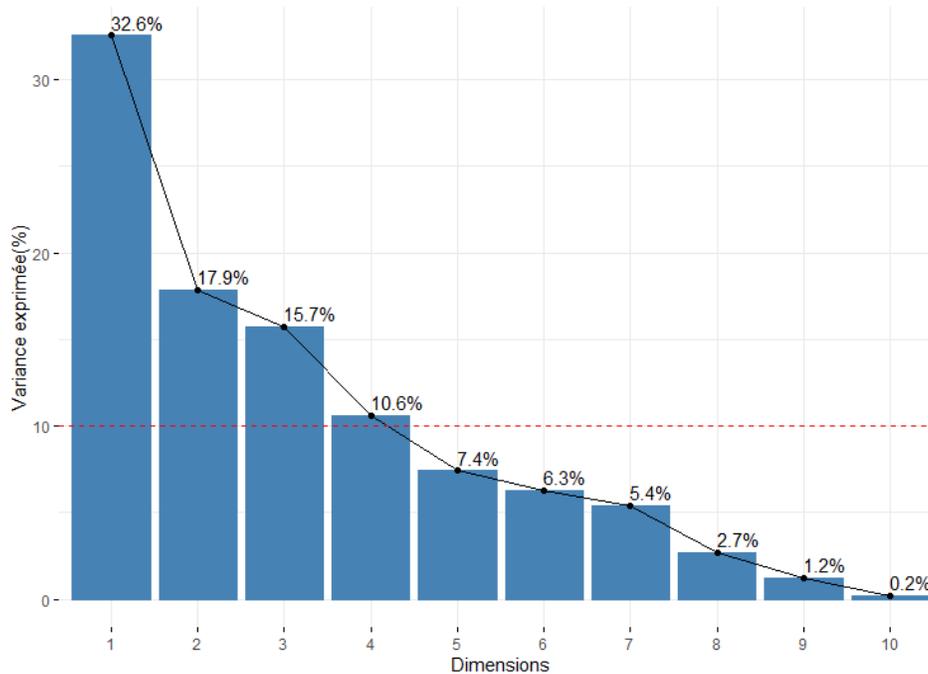
3. Organisation biogéographique du peuplement

3.1. Organisation biogéographique du géofaciès des sites

L'analyse factorielle mixte de donnée (AFMD) indique que 50,6 % d'inertie totale sont exprimées par les deux premières dimensions. Cela implique que 50,6 % de l'information expliquent

la variabilité totale ce plan et que 49,4 % est expliqué par les autres plans. Le critère de Kaiser est favorable à la sélection de deux autres dimensions ce qui porte à une inertie totale exprimée de 76,8 %. Selon ce critère seul les dimensions supérieures ou égales sont interprétées dans la formation d'inertie totale (Histogramme 28, ci-après).

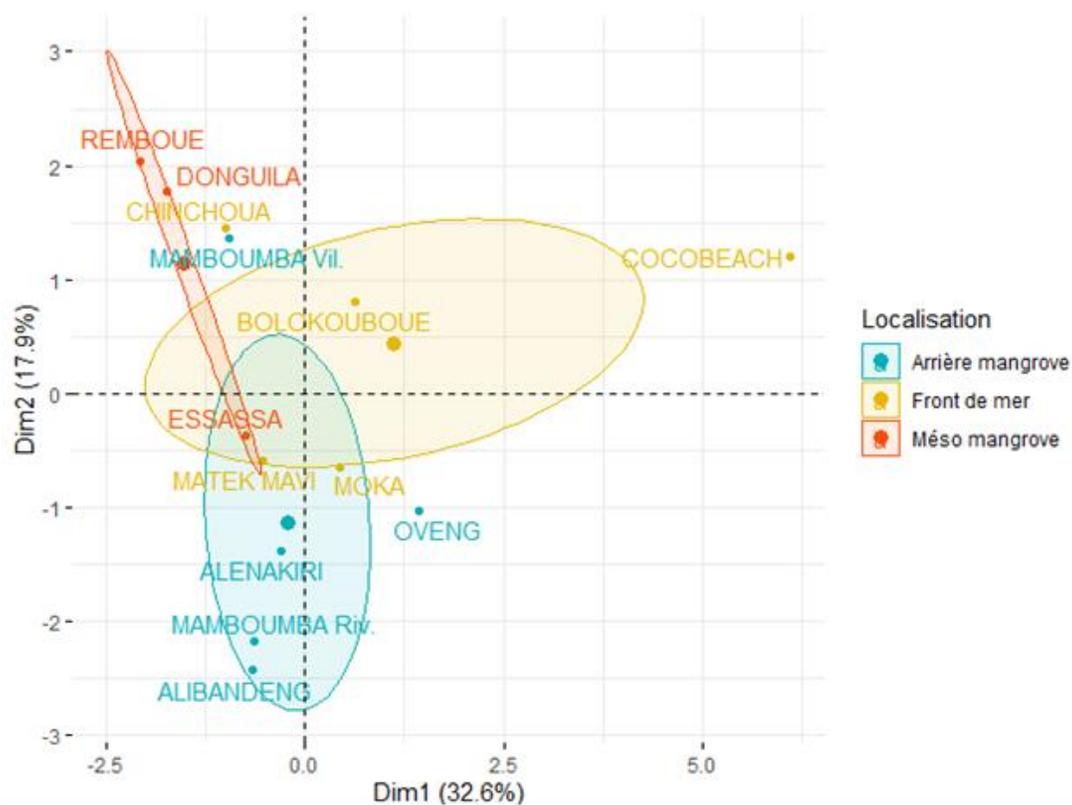
Histogramme 28 : Taux de contribution de l'inertie totale



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

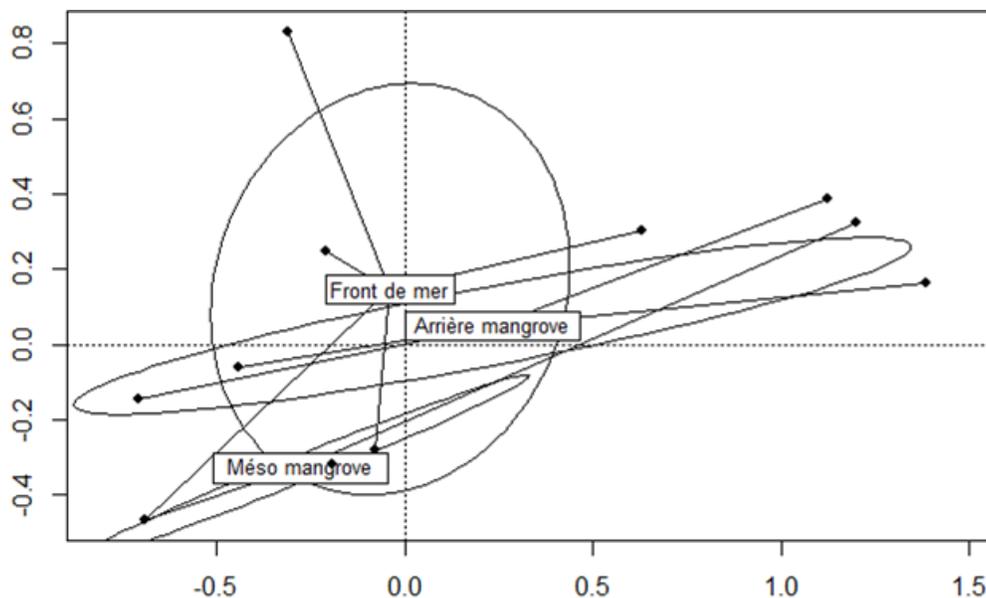
La dimension 1 oppose principalement les sites de front de mer des sites d'arrière-mangrove et méso mangrove. Ainsi Cocobeach, Bolokouboué et Moka sont corrélés positivement à l'axe tandis, Matek et Chinchoua sont corrélés négativement. Il est remarqué que Chinchoua est très proche biogéographiquement à Mamboumba village bien que géographique éloignés. Cela signifie que ces sites ont des caractéristiques d'abondance similaire, il en est de même des sites Essassa et Matek. La dimension 2 oppose les sites Remboué, Donguila, Chinchoua et Mamboumba village, Bolokouboué et Cocobeach corrélés positivement aux sites Essassa, Alénakiri, Matek, Moka, Oveng, Mamboumba rivière et Alibandeng corrélés négativement. Les sites de front de mer sont plus homogènes à ceux d'arrière-mangrove que de méso mangrove. Cela implique des similitudes des caractères biogéographiques entre les mangroves de front de mer et d'arrière-mangrove. Par contre, les sites de méso mangrove présentent de dissimilitude à ceux d'arrière et de front de mangrove (Figures 56 et 57, ci-après).

Figure 56: Carte factorielle des sites en fonction du géofaciès



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Figure 57: Carte factorielle des distances écologiques en fonction du centre de gravité des géofaciès



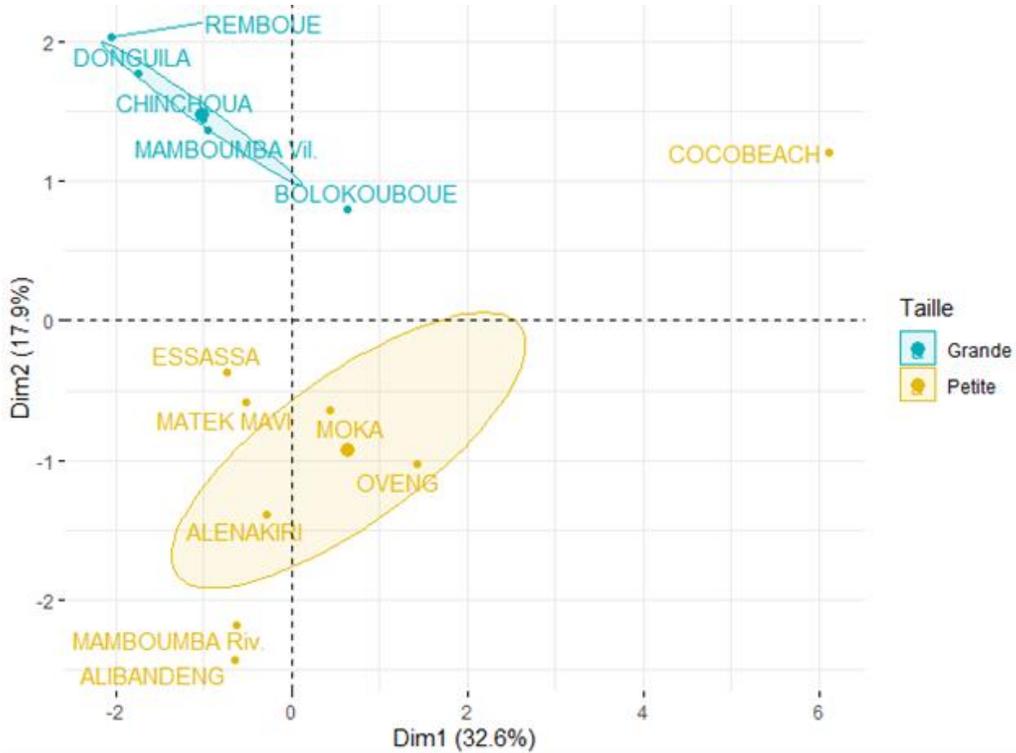
Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

En somme, le site Essassa présente les caractéristiques des trois géofaciès (front méso et arrière-mangrove). Ressassa est donc un site dit atypique primaire. Aussi, Moka et Matek sont similaires aux géofaciès front et arrière-mangrove dit atypique secondaire.

3.2. Organisation biogéographique des géohorizons

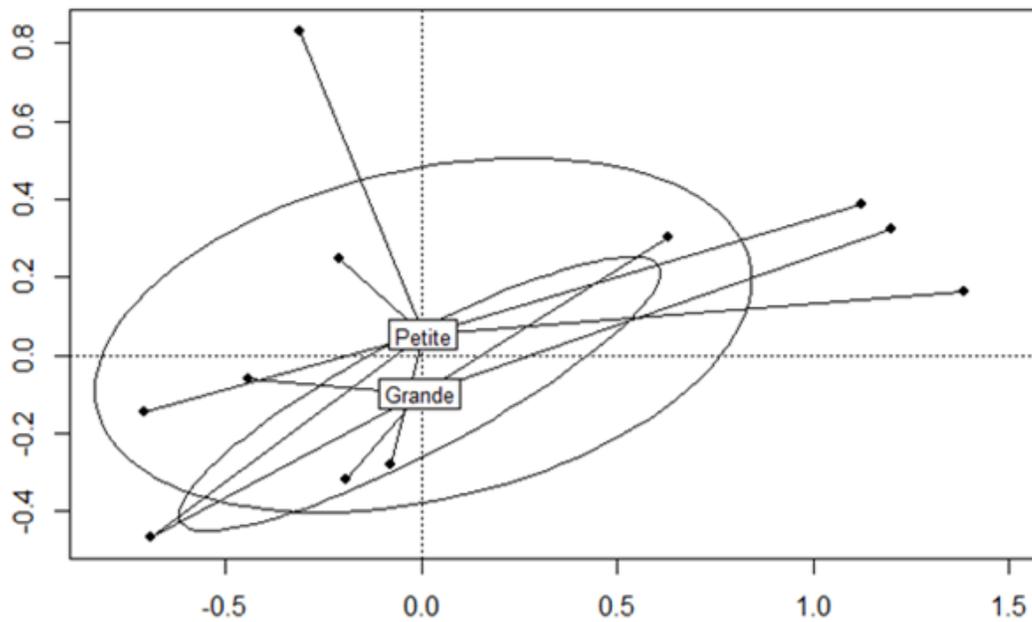
La première dimension oppose les sites de petite taille aux sites de grande taille. Cette opposition se manifeste par les sites Cocobeach, Moka, Bolokouboué et Oveng positivement corrélés qui s'opposent aux sites Remboué, Donguila, Chinchoua, Mamboumba village d'une part et Essassa, Matek, Alénakiri, Mamboumba rivière et Alibandeng d'autre part. Par ailleurs, Remboué et Donguila sont très proches, il en est de même de Mamboumba village et Chinchoua. Cela reflète une similitude dans les hauteurs dans les grandes mangroves. De même, dans les petites mangroves un rapprochement est observé entre les sites Essassa et Matek d'une part et entre Mamboumba rivière et Alibandeng d'autre part. Le spectre de petites mangroves est plus élargi que celui des grandes mangroves. En effet, les grandes mangroves sont présentes dans 5 sites tandis que les petites mangroves sont présentes sur 8 sites. 60 % des grandes mangroves sont localisées dans l'estuaire du Komo contre 40 % dans l'estuaire de la Mondah. S'agissant des petites mangroves, elles sont présentes à 63 % dans l'estuaire de la Mondah et 25 % dans l'estuaire du Komo et 13 % dans l'estuaire du Rio Mouni. En somme, les grandes mangroves sont plus caractéristiques de l'estuaire du Komo suivi de l'estuaire de la Mondah. Par contre, les petites mangroves sont plus caractéristiques des estuaires Mondah et Rio Mouni (Figures 58 et 59, ci-après).

Figure 58 : Carte factorielle des sites en fonction du géohorizon



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Figure 59: Carte factorielle des distances écologiques en fonction du centre de gravité des géohorizons

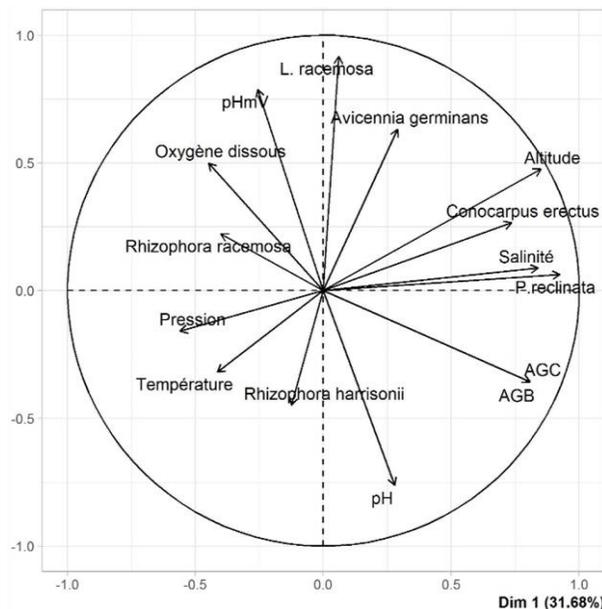


Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

3.3. Organisation biogéographique des taxons

Les caractères biogéochimique déterminent également les répartitions des espèces des mangroves. En effet, un sol ayant une basse salinité sera favorable à l'implantation de *Phoenix reclinata* et de la fougère dorée. À cet effet, le premier axe oppose *Rhizophora racemosa* positivement corrélé, tandis que *Rhizophora harrisonii* et *Avicennia germinans*. Aussi, il est observé une opposition entre d'une part l'oxygène dissous, la température, la pression, le pH positivement corrélés à la salinité, cation échangeable et le pHmV négativement corrélé. Par ailleurs, le deuxième axe oppose *Avicennia germinans* positivement corrélé à *Rhizophora harrisonii* et *Rhizophora racemosa* négativement corrélé à cet axe. Il ressort que la salinité, le pHmV et les cations échangeables sont les facteurs déterminant la distribution des *Avicennia germinans* à Donguila, à Mamboumba village et à Alénakiri car ces espèces sont fortement corrélées à ces différents paramètres. À cet effet, *Rhizophora harrisonii* est faiblement corrélé à la salinité, aux cations échangeables et aux pHmV. Une augmentation de ces trois paramètres entraîne une variation positive des *Avicennia germinans* et une variation négative de *Rhizophora harrisonii*. Par contre, les sites Bolokouboué et Remboué sont corrélés positivement à la température, le pH et l'oxygène dissous et abritent *Rhizophora racemosa*. Par conséquent variation positive du pH, de la température et de l'oxygène dissous favorise le développement de *Rhizophora racemosa* (Figure 60, ci-dessous).

Figure 60: Localisation des espèces en fonction des variables physico-chimiques



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

4. Organisation de stock de biomasse aérienne (AGB)

4.1. Stock de biomasse en fonction des estuaires

4.1.1. Komo

L'ensemble des sites du Komo totalise un AGB moyen de 537,21 t ha⁻¹. Donguila a une moyenne d'AGB qui oscille autour de 238,21 t ha⁻¹ soit, 44,34 % du stock total de l'ensemble des sites du Komo, tandis que Remboué dans la rive opposée à Donguila a 123 t ha⁻¹ en moyenne soit, 22,89 %. Chinchoua et Alénakiri détiennent des moyennes respectives de 98,5 t ha⁻¹ et de 63,49 t/ha, soit respectivement 18,33 % et 11,82 %. Enfin, arrive Matek avec 14 t/ha en moyenne soit, 2,61 % de l'AGB total du Komo. Il ressort que l'espèce *Avicennia germinans* est en tête de stockage dans cet estuaire avec un total 408,81 t ha⁻¹ soit, 76% de l'AGB total. Elle est suivie par *Rhizophora racemosa* et *Rhizophora harrisonii* ayant respectivement 299,3 et 260,31 t ha⁻¹.

4.1.2. Mondah

L'estuaire de la Mondah enregistre un AGB moyen de 839,59 t ha⁻¹ pour un total de 1348,91 t ha⁻¹. En effet, Mamboumba village a une moyenne 461,51 t ha⁻¹ pour un peu plus de 34,21%. Il est suivi de Bolokouboué avec un AGB moyen de 239,55 t ha⁻¹ soit 17,76%. Mamboumba rivière, Moka et Essassa ont un AGB moyen qui oscille entre 60 et 20 t ha⁻¹ soit, respectivement 58 t ha⁻¹ 48,86 t ha⁻¹ et 24,17 t ha⁻¹. Oveng et Alénakiri ont respectivement 4,38 t/ha et 4,12 t ha⁻¹. Aussi, dès trois espèces évaluées c'est *Avicennia germinans* qui stock le plus d'AGB avec une moyenne 483,313 t ha⁻¹ pour un total de 966,626 t ha⁻¹. *Rhizophora racemosa* et *Rhizophora harrisonii* ont tour à tour 64,005 t ha⁻¹ et 31,132 t ha⁻¹ (Tableau 31, ci-après).

4.1.3. Rio Mouni

Le Rio Mouni cumule un AGB moyen de 19,227 t ha⁻¹. Dans son site de Cocobeach qui regroupe toutes les espèces c'est *Laguncularia racemosa* qui est en tête avec 32 t ha⁻¹. Elle est suivie de très près par *Avicennia germinans* et *Rhizophora racemosa* avec respectivement 31,87 t

ha⁻¹ et 31,33 t ha⁻¹. Ensuite viennent *Conocarpus erectus* et *Rhizophora harrisonii* avec chacune 0,75 t ha⁻¹ et 0,18 t ha⁻¹. Il est constaté que l'espèce *Avicennia germinans* qui était en tête de peloton de stockage dans les estuaires Komo et Mondah occupe plutôt la deuxième place dans l'estuaire du Rio Mouni car surplombé par *Laguncularia racemosa*. Cette situation nous amène à étudier les similitudes de stock d'AGB entre les espèces et entre les sites (Tableau 31, ci-après).

Tableau 31 : Stock de biomasse aérienne des mangroves estuariennes par site

	<i>Rhizophora racemosa</i>	<i>Rhizophora harrisonii</i>	<i>Laguncularia racemosa</i>	<i>Conocarpus erectus</i>	<i>Avicennia germinans</i>	moyenne Site	Estuaire	Localisation	Taille
ALENAKIRI	0	61.430	0	0	65.553	63.492	Komo	Arrière mangrove	Petite
CHINCHOUA	98.5	0	0	0	0	98.5	Komo	Front de mer	Grande
DONGUILA	0	140.178	0	0	336.252	238.215	Komo	Méso mangrove	Grande
MATEK MAVI	0	13.501	0	0	0	14	Komo	Front de mer	Petite
REMOUE	200.8	45.2	0	0	0	123	Komo	Méso mangrove	Grande
TOTAL	299.3	260.308	0	0	401.805	961.414			
MOYENNE/Espèce	149.65	65.077	0	0	200.903	537.207			
ALIBANDENG	0	4.122	0	0	0	4.122	Mondah	Arrière mangrove	Petite
MAMBOUMBA Vil.	3.276	0	0	0	919.739	461.508	Mondah	Arrière mangrove	Grande
MAMBOUMBA Riv.	0	57.958	0	0	0	58	Mondah	Arrière mangrove	Petite
MOKA	48.645	0.184	0	0	46.887	47.858	Mondah	Front de mer	Petite
OVENG	4.382	0	0	0	0	4.382	Mondah	Arrière mangrove	Petite
ESSASSA	24.175	0	0	0	0	24.175	Mondah	Méso mangrove	Petite
BOLOKOUBOUE	239.549	0	0	0	0	239.549	Mondah	Front de mer	Grande
TOTAL	320.026	62.264	0	0	966.626	1348.915			
MOYENNE/Espèce	64.005	31.132	0	0	483.313	839.594			
COCOBEACH	31.331	0.183	31.997	0.754	31.867	19.227	Rio Moui	Front de mer	Petite
TOTAL	650.657	322.755	31.997	0.754	1400.298	2329.556			

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

4.2. Caractérisation de stock d'AGB par espèce

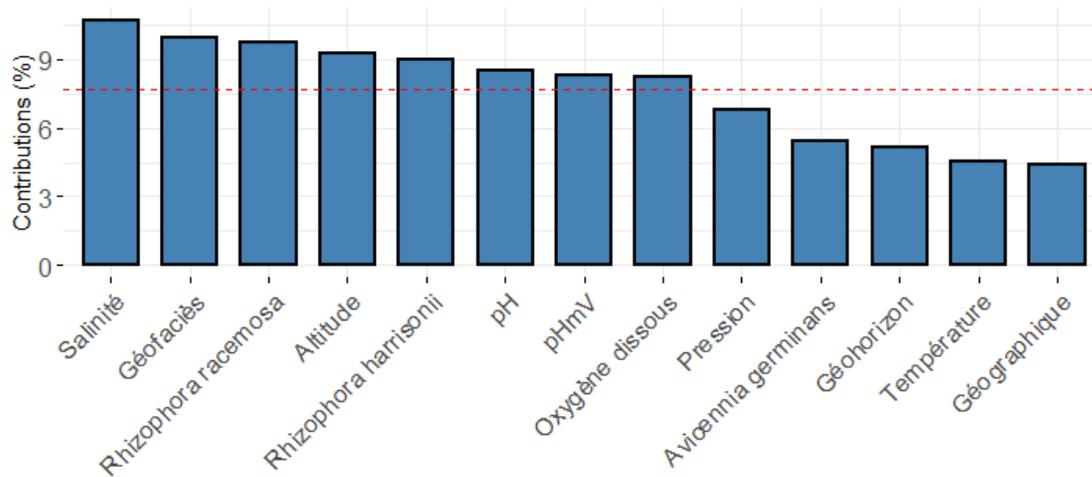
Les deux premières dimensions de cette analyse expriment 55,97 % de l'inertie totale de l'ensemble de données. Cela signifie que 55,97 % de la variabilité totale du nuage des variables et individus est expliquée sur ce plan factoriel. Toutefois, cette valeur est inférieure à la valeur de référence qui est égale à 59,20 % de la variabilité expliquée. En effet, à 95 % de quantile d'une distribution des pourcentages d'inertie obtenue en simulant 350 tableaux de taille équivalente sur une base uniforme. Étant dit que l'inertie simulée est inférieure à l'inertie exprimée par les données observées alors la variabilité exprimée n'est pas représentative en 2 dimensions. Il est donc judicieux d'ajouter les dimensions 3 et 4 (Tableau 32 et Histogrammes 29 et 30, ci-après). Ainsi, l'inertie totale exprimée passe de 55,64 à 85,39 %. Cela est nettement supérieur aux 59,20 % d'inertie totale exprimée en 350 tableaux de taille identique 95 % de tentative.

Tableau 32 : Contribution des dimensions à l'inertie totale expliquée

Dimension	Dimension.1	Dimension.2	Dimension.3	Dimension.4	Dimension.5
Variance	4.623	3.213	2.667	1.451	0.998
Variance %	33.022	22.949	19.05	10.364	7.131
Cumulative %	33.022	55.971	75.021	85.385	92.516

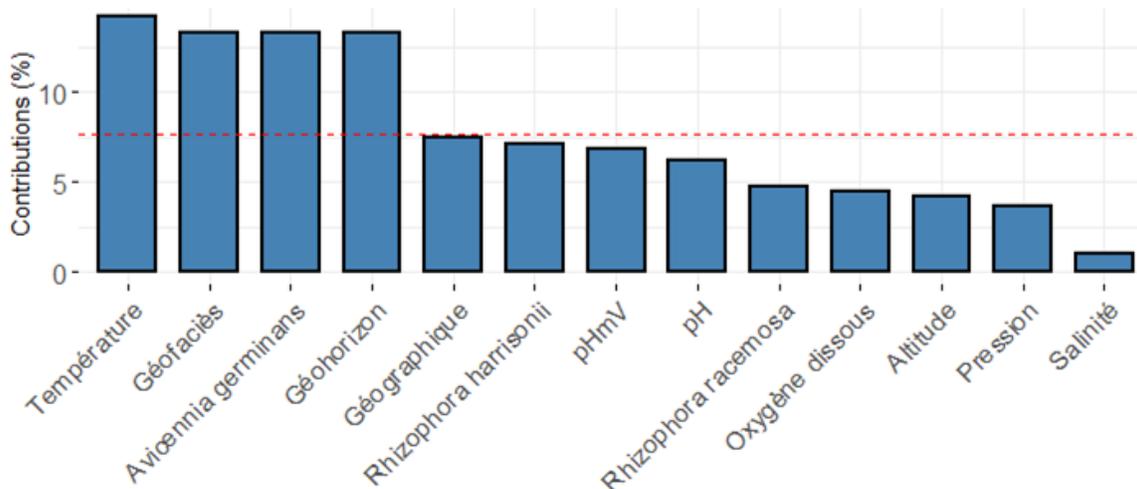
Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Histogramme 29 : Taux de contribution à l'inertie totale de l'information dans les dimensions 1 et 2



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

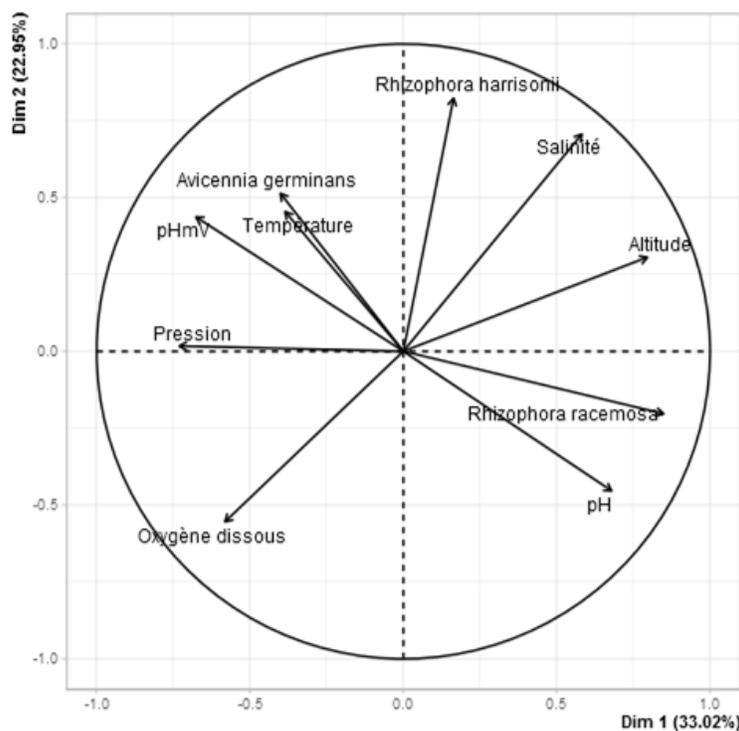
Histogramme 30 : Taux de contribution à l'inertie totale de l'information dans les dimensions 3 et 4



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

La première dimension oppose *Rhizophoraceae* corrélées positivement à *Avicenniaceae* corrélées négativement. Les *Rhizophoraceae* sont dans le sous quadrant que l'altitude, le pH et la salinité, tandis que le sous quadrant *Avicenniaceae* est accompagné du pHmV, de la température, de l'oxygène dissous et de la pression atmosphérique. La deuxième dimension oppose d'un côté les espèces *Avicennia germinans* et *Rhizophora harrisonii* à grande amplitude d'halotolérante et de l'autre côté *Rhizophora racemosa* espèce à petite amplitude d'halotolérance. Donc Chez les espèces *Rhizophora harrisonii* et *Rhizophora racemosa* la salinité, l'altitude et le pH joue un rôle dans la capacité de production de biomasse, donc dans leur capacité de stockage de carbone. Il en est de même chez l'espèce *Avicennia germinans* où la température, la pression atmosphérique, le pHmV et l'oxygène dissous joue également un rôle dans la capacité de la production de biomasse, donc la capacité de stockage de carbone (Figure 61 et Tableau 33, ci-après). Aussi, la situation biogéographie est également un facteur déterminant dans la capacité de stockage notamment le géofaciès. En effet, selon qu'une espèce soit localisée en front, en méso ou en arrière-mangrove influence sa capacité de stockage. Chez *Rhizophora racemosa* par exemple le géofaciès est corrélé à 63% au stock de biomasse. De même que chez *Avicennia germinans* où le géohorizon est corrélé à 25% au stock de biomasse (Figure 62, ci-après).

Figure 61: carte factorielle de l'AGB des mangroves estuariennes



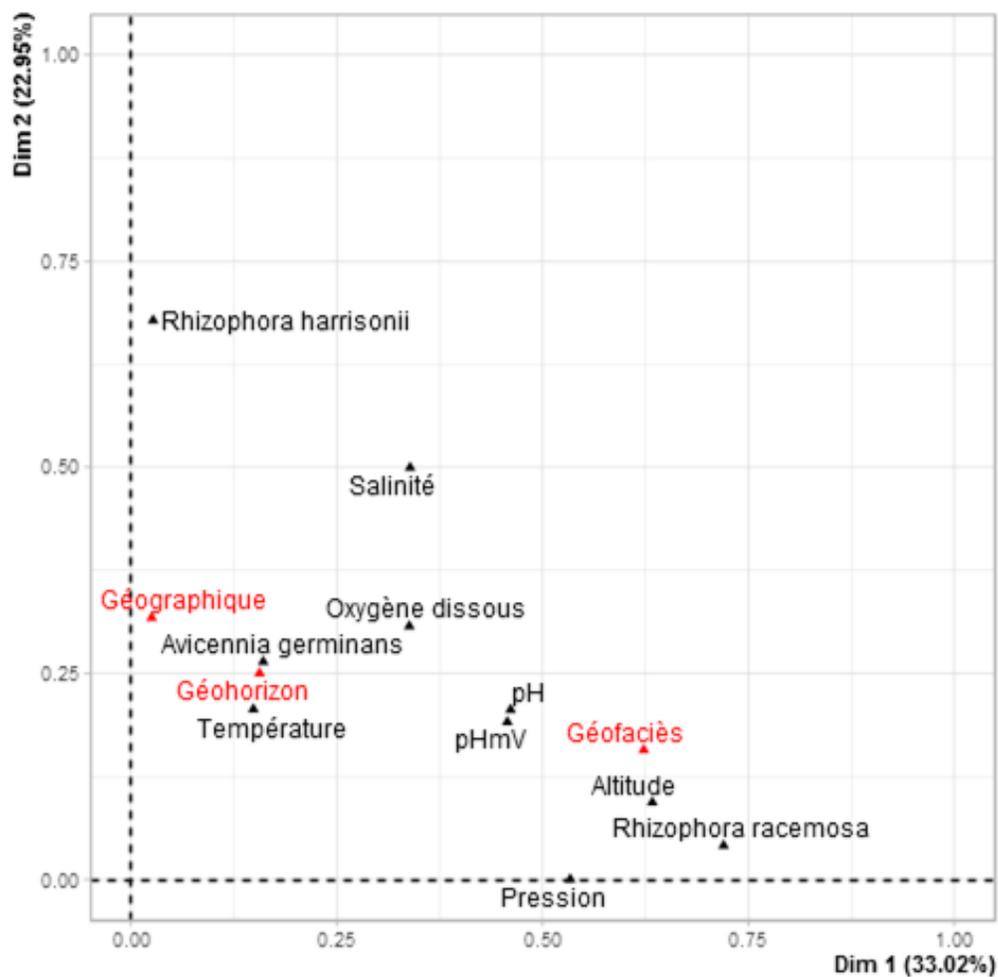
Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Tableau 33 : Appréciation de la représentativité des espèces sur la carte factorielle en fonction de l'AGB

Paramètres	Dimension.1	Contribution	cosnus2	Dimension.2	Contribution	cosnus2	Dimension.3	Contribution	cosnus2
Température	-0.386	3.216	0.149	0.454	6.428	0.207	-0.579	12.549	0.335
Pression	-0.731	11.543	0.534	0.017	0.009	0	-0.288	3.099	0.083
pH	0.679	9.976	0.461	-0.454	6.409	0.206	-0.441	7.305	0.195
pHmV	-0.676	9.89	0.457	0.437	5.946	0.191	0.483	8.742	0.233
Oxygène dissous	-0.581	7.314	0.338	-0.554	9.567	0.307	0.371	5.156	0.138
Salinité	0.582	7.334	0.339	0.707	15.549	0.5	0.191	1.364	0.036
Altitude	0.796	13.701	0.633	0.306	2.913	0.094	0.117	0.513	0.014
<i>Rhizophora racemosa</i>	0.849	15.574	0.72	-0.203	1.284	0.041	0.404	6.115	0.163
<i>Rhizophora harrisonii</i>	0.164	0.58	0.027	0.824	21.112	0.678	-0.417	6.519	0.174
<i>Avicennia germinans</i>	-0.401	3.475	0.161	0.514	8.222	0.264	0.712	19.007	0.507

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Figure 62: Carte factorielle des stocks d'AGB par espèce, géofaciès, géohorizon et par estuaire



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

4.3. Caractérisation de stock de l'AGB par site

Dans les 10 sites projetés ci-dessous il ressort que 85,11 % d'inertie sont représentées par 4 premiers axes. En effet, le premier axe cumule 33,98 %, le deuxième axe 21,66 %, le troisième 16,65 % et 12,82 % pour le quatrième axe. Cocobeach est le site le plus éloigné du centre avec une distance de 6,22 ; une coordonnée de 6,06 à la première dimension ainsi qu'une contribution de 83,31 % et un angle de 95 % de cosinus². Il s'y oppose à gauche au site de Donguila situé à une distance de 4,02 avec une coordonnée de -1,86 à la première dimension avec une contribution de 7,89 % et ainsi qu'un angle de 0,21 de cosinus². Toutefois, la première dimension constituée des sites Cocobeach, Moka et Matek s'opposent aux sites Alénakiri, Alibandeng, Chinchoua, Donguila, Mamboumba Village, Mamboumba Rivière et Oveng. La deuxième dimension quant à elle oppose Chinchoua, Cocobeach, Donguila et Matek à Alénakiri, Alibandeng, Mamboumba Village, Mamboumba Rivière, Moka et Oveng. Par contre, la troisième dimension oppose Alénakiri, Cocobeach, Donguila, Mamboumba Village, Mamboumba Rivière à Alibandeng, Matek, Moka et Oveng (Tableau 34, ci-après).

Tableau 34 : Appréciation de la représentativité des sites sur la carte factorielle en fonction de l'AGB

Site	Distance	Dimension 1	Contribution	cosnus ²	Dimension 2	Contribution	cosnus ²	Dimension 3	Contribution	cosnus ²
ALENAKIRI	2.294	-0.647	0.948	0.08	-0.638	1.448	0.077	1.233	7.018	0.289
ALIBANDENG	2.028	-0.16	0.058	0.006	-1.893	12.73	0.872	-0.208	0.199	0.01
CHINCHOUA	2.433	-0.297	0.199	0.015	1.465	7.625	0.363	-1.2	6.651	0.243
COCOBEACH	6.225	6.067	83.313	0.95	0.834	2.473	0.018	1.008	4.695	0.026
DONGUILA	4.022	-1.867	7.893	0.216	2.015	14.416	0.251	2.793	36.033	0.482
MAMBOUMBA Vil.	3.934	-1.078	2.633	0.075	-1.199	5.109	0.093	0.752	2.611	0.037
MAMBOUMBA Riv.	2.127	-0.449	0.457	0.045	-1.578	8.847	0.55	0.537	1.334	0.064
MATEK MAVI	2.161	0.143	0.046	0.004	0.037	0.005	0	-0.286	0.378	0.018
MOKA	1.919	0.307	0.213	0.026	-0.714	1.809	0.138	-1.286	7.645	0.449
OVENG	2.039	-0.14	0.045	0.005	-1.892	12.719	0.861	-0.292	0.395	0.021

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

4.4. Stock d'AGB et croisement entre géographie et biogéographie et taxonomie

Les estuaires Komo, Mondah et Rio Mouni sont considérés comme des espaces géographiques tandis que, arrière-mangrove, front de mer et méso mangrove qui relèvent du géofaciès. Petite et grande mangrove révèlent du géohorizon. Le géohorizon et géofaciès s'agissant des végétaux relèvent de critères biogéographiques. Ainsi, la première dimension oppose Rio Mouni, front de mer, petite mangrove positivement corrélé à Komo, Mondah, arrière-mangrove, méso mangrove et grande mangrove négativement corrélé. L'estuaire du Rio Mouni a une valeur test

(v.test) supérieur à 2. Rappelons que la v.test prend des valeurs comprises entre [-2 et 2] sauf si les individus qui prennent la modalité ont des coordonnées significativement différentes de 0. Autrement dit, une v.test inférieur à -2 signifie que les individus qui prennent la modalité ont des coordonnées significativement inférieures 0. De même, une v.test est supérieur 2 signifie que les individus qui prennent la modalité ont des coordonnées significativement supérieurs à 0 (Pagès, 2004). Donc dans la première dimension les individus qui prennent la modalité Rio Mouni ont des coordonnées significativement supérieures à 0 en moyenne. Il en est de même dans la deuxième dimension ou Komo et grande mangrove ont des individus dans les modalités qui prennent des coordonnées significativement supérieures à 0 en moyenne. Cette situation n'est pas en reste dans la troisième dimension. En effet, les modalités Mondah, arrière mangrove et petite mangrove ont des individus qui prennent des coordonnées significativement supérieures à 0 (Tableau 35, ci-après).

Tableau 35 : Appréciation de la représentativité des critères géosystémiques sur la carte factorielle en fonction de l'AGB

Critères	Dimension 1	Contribution	cosnus ²	v.test	Dimension 2	Contribution	cosnus ²	v.test	Dimension 3	Contribution	cosnus ²	v.test
Komo	-0.793	2.093	0.236	-1.178	1.114	10.183	0.466	2.074	0.466	3.009	0.081	0.988
Mondah	-0.301	0.421	0.065	-0.61	-0.915	9.615	0.603	-2.327	-0.477	4.413	0.164	-1.382
Rio Mouni	6.067	24.517	0.95	3.291	0.834	1.142	0.018	0.567	1.008	2.82	0.026	0.781
Arrière mangrove	-0.495	0.816	0.09	-0.735	-1.44	17.012	0.763	-2.68	0.404	2.268	0.06	0.858
Front de mer	1.197	4.776	0.498	1.779	0.591	2.863	0.121	1.1	-0.885	10.86	0.272	-1.878
Méso mangrove	-1.171	2.74	0.266	-1.205	1.416	9.862	0.389	1.825	0.801	5.337	0.125	1.177
Grande	-0.954	3.031	0.285	-1.417	1.261	13.042	0.498	2.347	-0.105	0.154	0.003	-0.223
Petite	0.596	1.894	0.285	1.417	-0.788	8.151	0.498	-2.347	0.066	0.096	0.003	0.223

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

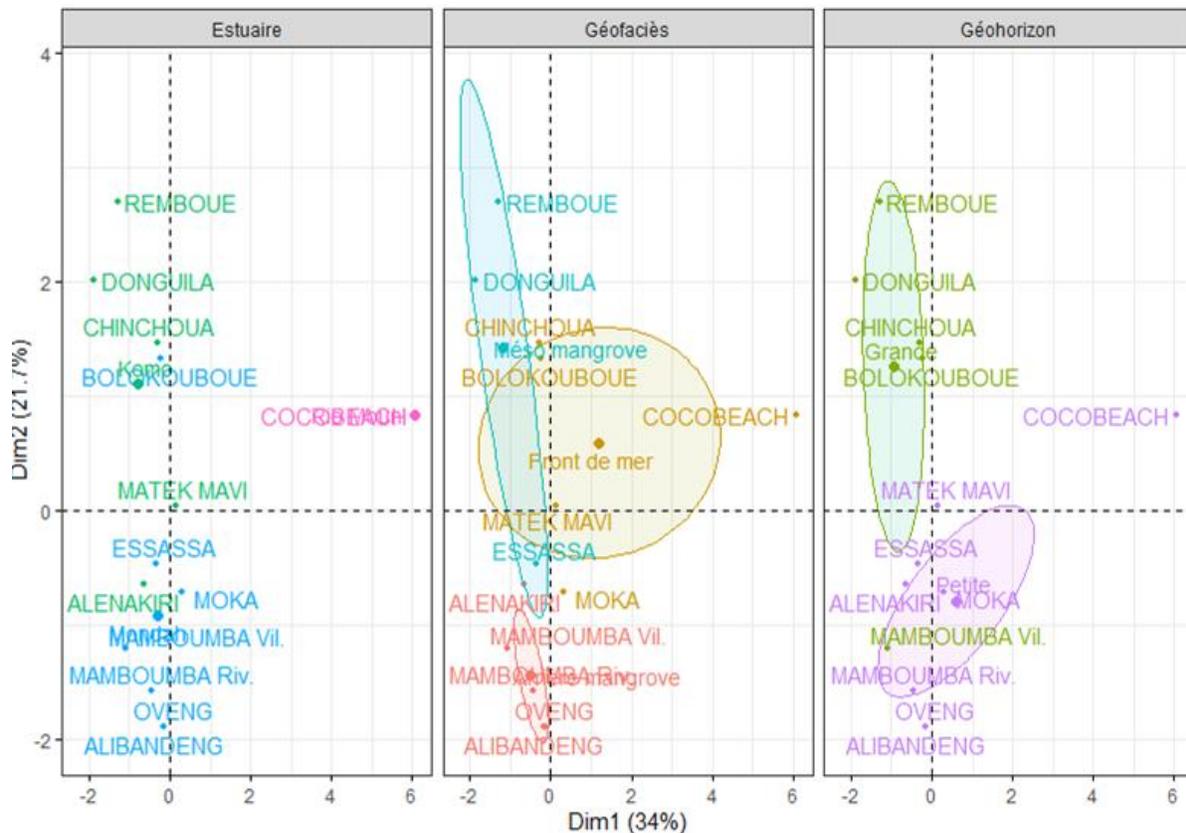
Le géofaciès, géohorizon et l'estuaire ont des rapports de corrélation respective de 65 %, 45 % et 45,3 % au seuil de 5 %. Synthétiquement variable Rio Mouni a un coefficient positif de 4,40. Front de mer a un coefficient positif de 1,35. Petite mangrove et grande mangrove respectivement 0,77 et -0,77. Globalement, les stocks de l'AGB de certains peuplements de petite mangrove de front de mer dans le Rio Mouni sont significativement supérieurs à la moyenne au seuil de 5%. Autrement dit, dans 95% de cas les petites mangroves de front de mer dans Rio Mouni ont une biomasse aérienne (AGB) supérieur à la moyenne. *Rhizophora racemosa* est corrélé positivement à 0,65 au seuil de 5 % soit, une p-value de 0,0156 dans la deuxième dimension. Et les variables biogéographiques que sont géofaciès et géohorizon ainsi que la variable géographique estuaire ont des rapports de corrélation respectifs de 0,65 ; 0,46 et 0,45 à cette même dimension 2. De plus, les

individus des modalités grande mangrove (géohorizon) et de la modalité Komo (estuaire) sont positivement coéfficiées soit, 1,02 pour le premier 0,77 pour le second au seuil significatif de 5% soit, 0,011 et 0,030 respectivement. Par contre, individus qui prennent les modalités Mondah (estuaire), petite mangrove (géohorizon) et arrière mangrove (géofaciès) sont négativement coéfficiées soit, -1,25 ; -1,02 et -1,62 au seuil significatif de 5 % soit, 0,011 ; 0,010 et 0,0019 de p-value respectif. Donc, les grands *Rhizophora racemosa* qui peuplent l'estuaire du Komo ont des stocks d'AGB significativement supérieur à la moyenne, tandis que les petits *Rhizophora racemosa* situés en arrière mangrove dans l'estuaire de la Mondah détiennent des stocks d'AGB significativement inférieur à la moyenne en général. Cela vient à dire que la capacité de stockage est plus lié à l'espèce elle-même autrement à ces propriétés physico-chimiques que de sa localisation géographique. Donc, ici, le critère biogéographique prime sur le critère géographique. Une mangrove ne stocke pas plus ou moins selon qu'elle se trouve dans l'un ou l'autre des estuaires ; mais, par contre, selon qu'elle est un *Rhizophora racemosa*, un *Avicennia germinans*, un *Rhizophora harrisonii* ou un *Laguncularia racemosa*.

Le critère géographique oppose d'un côté Cocobeach, Moka et Matek à Remboué, Donguila, Chinchoua, Bolokouboué, Essassa, Alénakiri, Mamboumba Village, Mamboumba Rivière, Oveng et Alibandeng. Et de l'autre côté une opposition de Remboué, de Donguila, de Chinchoua, de Bolokouboué, de Cocobeach et de Matek à Essassa, Alénakiri, Moka, Mamboumba Village, Mamboumba Rivière, Oveng et Alibandeng d'autre part. L'analyse des géofaciès que les sites de méso mangrove ont la particularité d'avoir des stocks d'AGB similaires aussi bien pour le front de mer, de méso mangrove et arrière mangrove. Aussi, les sites de front de mer ont des stocks d'AGB proches de ceux de méso mangrove. Par contre, les sites d'arrière mangrove n'ont pas des similitudes de stock d'AGB avec les autres groupes. Les stocks d'AGB des sites Alibandeng et Oveng sont similaires. Cette similitude est marquée par la proximité dans le plan factoriel. De manière générale, les stocks de l'AGB sont plus homogènes chez les individus situés en arrière mangrove. Par contre, le géofaciès méso mangrove a des stocks hétérogènes. Par exemple, Essassa qui fait partie de ce géofaciès est plus proche d'Alénakiri qui fait partie de géofaciès arrière mangrove que de Donguila du même groupe que lui. Les sites Chinchoua et Bolokouboué du géofaciès front de mer sont proches du centre de gravité du géofaciès méso mangrove. Cela implique une similitude dans les stocks des peuplements entre ces deux géofaciès. Par ailleurs, Cocobeach qui est une

partie intégrante du géofaciès front de mer est très éloigné de centre de gravité et sort du cercle de corrélation du groupe. Cocobeach est donc qualifié de site atypique. Cette particularité de Cocobeach est également manifestée dans le géohorizon. Cocobeach fait partie du géohorizon de petite mangrove, pourtant il est très éloigné de son centre de gravité. Les stocks de l'AGB des petites mangroves sont plus homogènes que ceux des grandes mangroves. En effet, Alibandeng, Oveng et Mamboumba rivière sont très proches dans la projection en espace réduit. Il en est de même des sites Essassa et Alénakiri, par ailleurs proche du centre de gravité du géohorizon petite mangrove. Par contre, l'AGB des grandes mangroves est hétérogène. En effet, Mamboumba Village fait partie des grandes mangroves. Toutefois, Mamboumba Village qui est peuplé de grande mangrove est proche du centre de gravité des petites mangroves (Figure 63, ci-après).

Figure 63: Influence entre critère géographique et critères biogéographiques dans la distribution de l'AGB par site

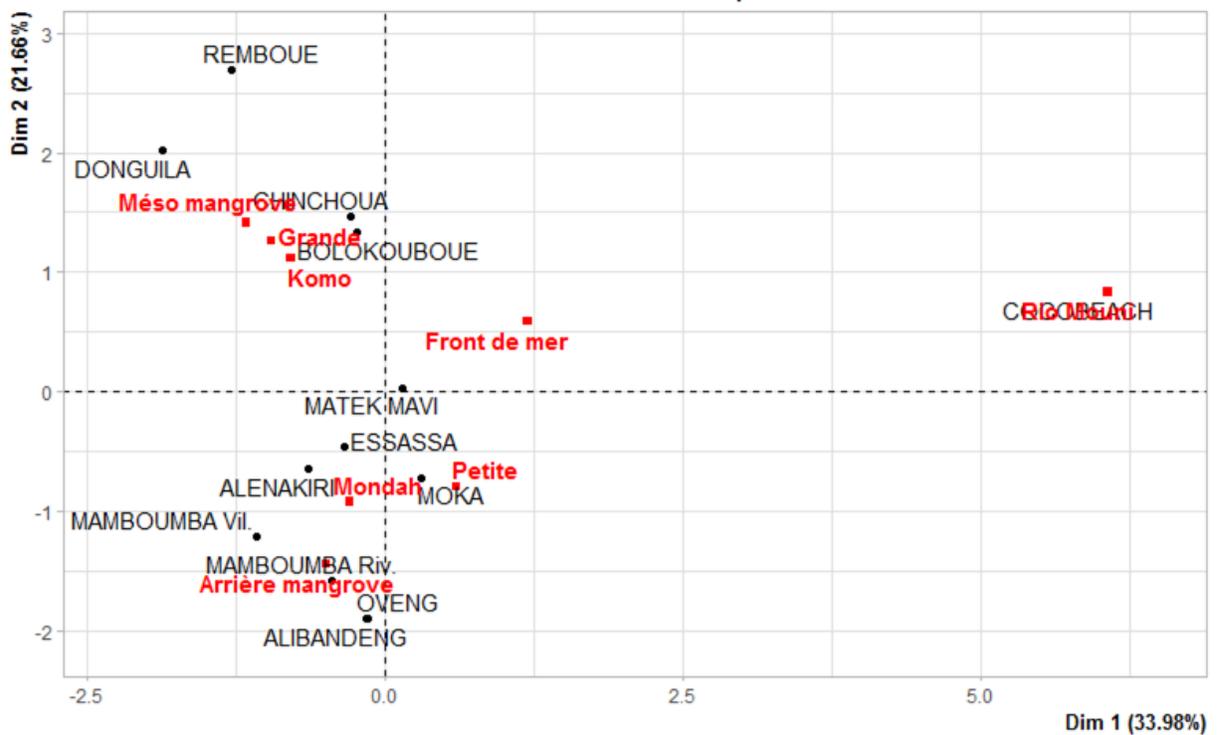


Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Le plan factoriel des sites marque une nette opposition entre les petites mangroves et les grandes mangroves d'une part. Et une opposition entre le front de mer et mésomangrove ainsi que

l'arrière mangrove dans la première dimension. La deuxième dimension oppose les grandes mangroves, méso mangroves front de mer à petite mangrove et arrière mangrove. Selon l'encadré gauche du plan factoriel les grandes mangroves et méso mangroves sont caractéristiques de l'estuaire du Komo en général. Toutefois, elles sont également observées à Bolokouboué qui est un site de l'estuaire de la Mondah. Par contre, les petites mangroves sont une caractéristique de l'estuaire de la Mondah en général mais, on en retrouve aussi à Alénakiri bien que faisant partie de l'estuaire du Komo. Toutefois, excepté Bolokouboué qui est un site de l'estuaire de la Mondah où se rencontrent les grandes mangroves, les grandes mangroves sont une spécificité de l'estuaire du Komo. Par contre les petites mangroves se rencontrent dans tous les estuaires à des proportions variées. Par exemple Matek Mavi et Alénakiri sont deux sites de l'estuaire du Komo où se rencontrent les petites mangroves (Figure 64, ci-après).

Figure 64: Carte factorielle des sites et des critères géosystémiques

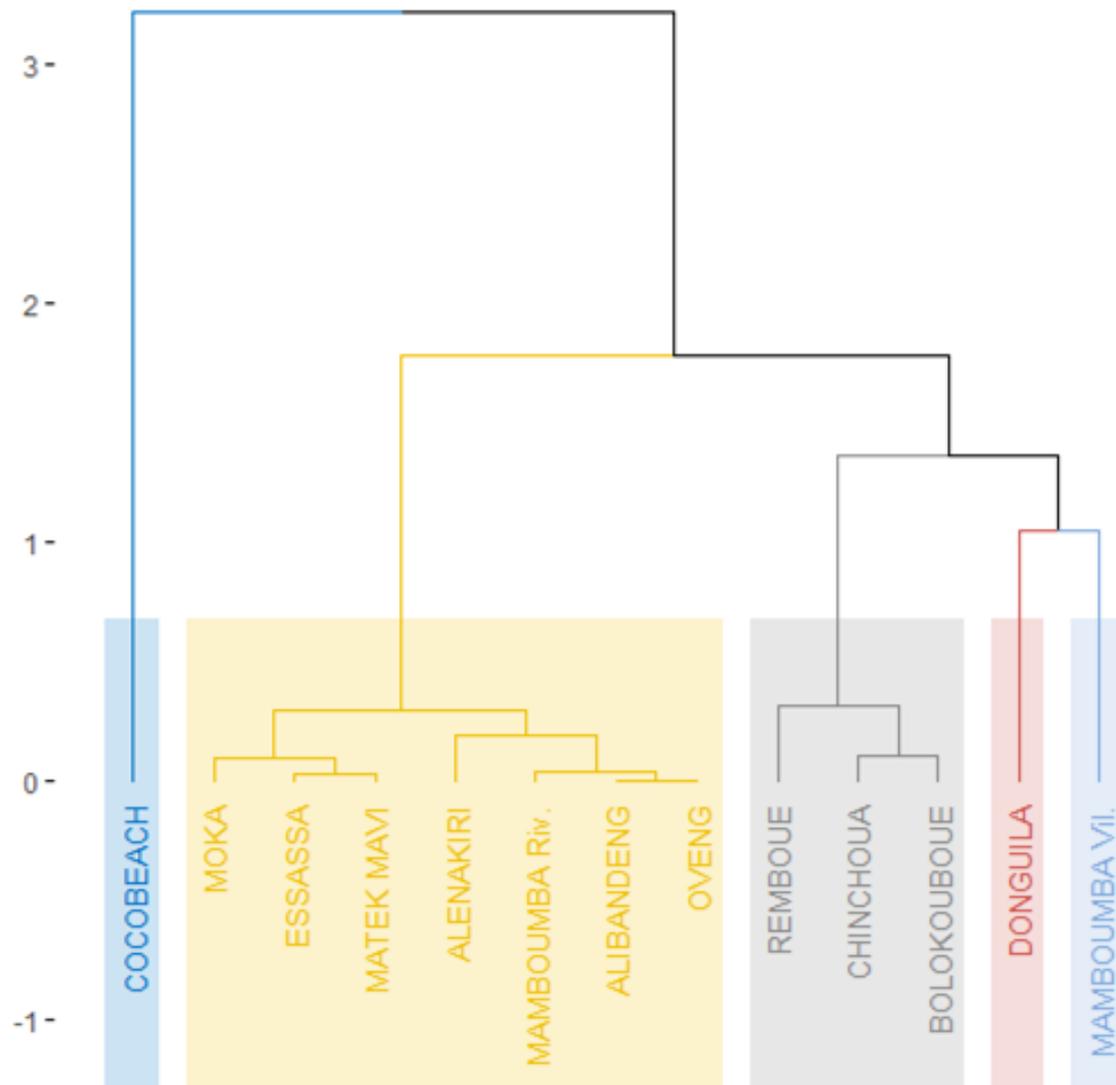


Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Néanmoins, sans tenir des critères géographiques et biogéographiques comme discriminants, les stocks se subdivisent en 5 groupes. En effet, Moka, Essassa, Alénakiri, Mamboumba Rivière, Alibandeng et Oveng constituent le plus grand groupe. Ensuite, il y'a Remboué, Chinchoua et

Bolokouboué dont chacun forme un groupe singleton. Cependant, Donguila et Mamboumba Village sont deux groupes très proches. Et tous deux sont proches du groupe Remboué Chinchoua et Bolokouboué. Ce précédent groupe de trois est très proche du grand groupe Moka, Essassa, Alénakiri, Mamboumba Rivière, Alibandeng et Oveng qui, lui est très proche du groupe singleton Cocobeach (Figure 65, ci-après).

Figure 65: Dendrogramme des sites à mangroves estuarienne en fonction du stock de l'AGB



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Le groupe Moka, Essassa, Alénakiri, Mamboumba Rivière, Alibandeng et Oveng se subdivise en deux sous-groupe : le premier est constitué de Moka, Essassa et Matek et le second sous-groupe

regorge les sites Alénakiri, Mamboumba Rivière, Alibandeng et Oveng. Le groupe formé de Remboué, Chinchoua et Bolokouboué se subdivise en deux sous-groupes : un singleton formé de Remboué et de sous-groupe que forment Chinchoua et Bolokouboué.

4.5. Stock AGB, AGC et AGCO₂ à partir des sites et espèces caractéristiques

- Stock AGB, AGC et AGCO₂ par des sites caractéristiques

Dans l'estuaire du Komo, Donguila a un stock d'AGB total de 476,43 t ha⁻¹ contre 126,98 à Alénakiri et 13,5 t ha⁻¹ à Matek Mavi. S'agissant de l'estuaire de la Mondah c'est Mamboumba riv. qui est en tête avec un total d'AGB de 923,02 t ha⁻¹. Il est suivi de Bolokouboué qui a 239,55 t/ha. Ensuite viennent Essassa, Oveng et Alibandeng avec respectivement 24,17 t ha⁻¹; 4,38 t ha⁻¹ et 4,12 t ha⁻¹ (Tableau 36, ci-après).

Tableau 36 : Stock de biomasse aérienne des mangroves estuariennes

	<i>Rhizophora racemosa</i>	<i>Rhizophora harrisonii</i>	<i>Avicennia germinans</i>	moyenne espèce	TOTAL	Géographique	Géofaciès	Géohorizon
DONGUILA	0	140,18	336,25	238,21	476,43	Komo	Méso mangrove	Grande
MATEK	0	13,5	0	14	13,5	Komo	Front de mer	Petite
ALENAKIRI	0	61,43	65,55	63,49	126,98	Komo	Arrière mangrove	Petite
MOYENNE	0	71,70	133,93	105,23	205,63			
TOTAL	0	215,11	401,81	315,71	616,91			
MAMBOUMBA Riv.	3,28	0	919,74	461,51	923,02	Mondah	Arrière mangrove	Petite
BOLOKOUBOUE	239,55	0	0	239,55	239,55	Mondah	Front de mer	Grande
OVENG	4,38	0	0	4,38	4,38	Mondah	Arrière mangrove	Petite
ESSASSA	24,17	0	0	24,17	24,17	Mondah	Méso mangrove	Petite
ALIBANDENG	0	4,12	0	4,12	4,12	Mondah	Arrière mangrove	Petite
MOYENNE	54,276	0,824	183,948	146,746	239,048			
TOTAL	271,38	4,12	919,74	733,73	1195,24			
TOTAL	271,38	219,23	1321,55	1049,44	1812,15			

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

En termes d'AGC, dans l'estuaire du Komo, Donguila a 238,15 t ha⁻¹, suivit d'Alénakiri qui totalise 63,49 t/ha et Matek Mavi avec 6,75 t ha⁻¹. Tandis que Mamboumba rivière dans l'estuaire de la Mondah cumule 461,51 t ha⁻¹, Bolokouboué suit avec ses 119,775 t ha⁻¹ contre, 12,085 t ha⁻¹ pour Essassa, 2,19 t ha⁻¹ pour Oveng et 2,06 pour Alibandeng (Tableau 37, ci-après).

Tableau 37 : Stock de carbone aérien des mangroves estuariennes

	<i>Rhizophora racemosa</i>	<i>Rhizophora harrisonii</i>	<i>Avicennia germinans</i>	moyenne espèce	TOTAL	Géographique	Géofaciès	Géohorizon
DONGUILA	0	70,09	168,125	119,105	238,215	Komo	Méso mangr	Grande
MATEK	0	6,75	0	7	6,75	Komo	Front de mer	Petite
ALENAKIRI	0	30,715	32,775	31,745	63,49	Komo	Arrière mang	Petite
MOYENNE	0	35,85	66,96	52,61	102,82			
TOTAL	0	107,555	200,905	157,855	308,455			
MAMBOUMBA Riv.	1,64	0	459,87	230,755	461,51	Mondah	Arrière mang	Petite
BOLOKOUBOUE	119,775	0	0	119,775	119,775	Mondah	Front de mer	Grande
OVENG	2,19	0	0	2,19	2,19	Mondah	Arrière mang	Petite
ESSASSA	12,085	0	0	12,085	12,085	Mondah	Méso mangr	Petite
ALIBANDENG	0	2,06	0	2,06	2,06	Mondah	Arrière mang	Petite
MOYENNE	27,14	0,41	91,975	73,375	119,525			
TOTAL	135,69	2,06	459,87	366,865	597,62			
TOTAL	135,69	109,615	660,775	524,72	906,075			

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

L'équivalence en AGCO² donne 871,87 t/ha pour Donguila, 232,37 t/ha pour Alénakiri et 24,705 à Matek Mavi. Dans la Mondah, Mamboumba rivière cumule 1689,12 t/ha contre 438,37 pour Bolokouboué. Ils sont suivis d'Essassa qui totalise 44,23 t ha⁻¹, d'Oveng qui a 8,01 et d'Alibandeng avec 7,53 t ha⁻¹ (Tableau 38, ci-après).

Tableau 38 : Stock de CO₂ aérien des mangroves estuariennes

	<i>Rhizophora racemosa</i>	<i>Rhizophora harrisonii</i>	<i>Avicennia germinans</i>	moyenne espèce	TOTAL	Géographique	Géofaciès	Géohorizon
DONGUILA	0	2,565,294	615,3375	435,9243	871,8669	Komo	Méso mangrove	Grande
MATEK	0	24,705	0	25,62	24,705	Komo	Front de mer	Petite
ALENAKIRI	0	112,4169	119,9565	116,18	232,3734	Komo	Arrière mangrove	Petite
MOYENNE	0	131,216	245,101	192,58	376,321			
TOTAL	0	393,6513	735,3123	577,749	1128,9453			
MAMBOUMBA Riv.	60,024	0	1683,1242	844,563	1689,1266	Mondah	Arrière mangrove	Petite
BOLOKOUBOUE	4,383,765	0	0	438,376	438,3765	Mondah	Front de mer	Grande
OVENG	80,154	0	0	8,015	8,0154	Mondah	Arrière mangrove	Petite
ESSASSA	442,311	0	0	44,231	44,2311	Mondah	Méso mangrove	Petite
ALIBANDENG	0	7,5396	0	7,539	7,5396	Mondah	Arrière mangrove	Petite
MOYENNE	993,324	0,41	336,6285	268,552	437,4615			
TOTAL	4,966,254	7,5396	1683,1242	1342,725	2187,2892			
TOTAL	4,966,254	401,1909	2418,4365	1920,475	3316,2345			

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

- Stock AGB, AGC et AGCO² par espèces caractéristiques

La primatie de stockage AGB, AGC et AGCO² par espèce est détenu par *Avicennia germinans* avec des moyennes respectives de 280,05 ± 169,45 t ha⁻¹; 140,02 t ha⁻¹ ± 84,72 t ha⁻¹ et 513,90

t ha⁻¹ ± 310,95 t ha⁻¹. Il est suivi par *Rhizophora racemosa* avec des moyennes de 81,33 t/ha ± 32,30 t/ha ; 40,66 t ha⁻¹ ± 16,15 t ha⁻¹ et 149 t ha⁻¹ ± 59,28 t ha⁻¹. Et enfin, *Rhizophora harrisonii* qui a des moyennes respectives de 40,43 t ha⁻¹ ± 16,90 t ha⁻¹; 20,17 t ha⁻¹ ± 8,45 t ha⁻¹ et 74,03 t ha⁻¹ ± 31,01 t ha⁻¹ (Tableaux 38, ci-avant et 39 et 41, ci-après).

Tableau 39 : Descriptions quantitatives de stock AGB des mangroves estuariennes par espèces et sites caractéristiques

Paramètres statistiques	Espèces			Sites				
	<i>Rhizophora racemosa</i>	<i>Rhizophora harrisonii</i>	<i>Avicennia germinans</i>	ALENAKIRI	COCOBEACH	DONGUILA	MAMBOUMBA VII.	MOKA
Moyenne	81,33	40,34	280,05	63,49	19,22	238,21	461,50	31,90
Erreur-type	32,30	16,90	169,45	2,06	7,65	98,03	458,23	15,86
Médiane	39,98	29,35	65,55	63,49	31,33	238,21	461,50	46,88
Écart-type	91,37	47,81	378,92	2,91	17,12	138,64	648,03	27,48
Kurtosis	-0,37	2,12	2,69	NA	-3,32	NA	NA	NA
Skewness	1,09	1,41	1,71	NA	-0,60	NA	NA	-1,72
Plage	236,27	139,99	887,87	4,12	31,81	196,07	916,46	48,46
Minimum	3,27	0,18	31,86	61,43	0,18	140,17	3,27	0,18
Maximum	239,54	140,17	919,73	65,55	31,99	336,25	919,73	48,64
Somme	650,65	322,75	1400,29	126,98	96,13	476,42	923,01	95,71
Nombre d'échantillons	8	8	5	2	5	2	2	3
Maximum	239,54	140,17	919,73	65,55	31,99	336,25	919,73	48,64
Minimum	3,27	0,18	31,86	61,43	0,18	140,17	3,27	0,18
Niveau de confiance (95.0%)	76,39	39,97	470,49	26,19	21,26	1245,68	5822,38	68,27

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Tableau 40 : Descriptions quantitatives de stock AGC des mangroves estuariennes par espèces et sites caractéristiques

Paramètres statistiques	Espèces			Sites				
	<i>Rhizophora racemosa</i>	<i>Rhizophora harrisonii</i>	<i>Avicennia germinans</i>	ALENAKIRI	COCOBEACH	DONGUILA	MAMBOUMBA VII.	MOKA
Moyenne	40,66	20,17	140,02	31,74	9,61	119,10	230,75	15,95
Erreur-type	16,15	8,45	84,72	1,03	3,82	49,01	229,11	7,93
Médiane	19,99	14,67	32,77	31,74	15,66	119,10	230,75	23,44
Écart-type	45,68	23,90	189,46	1,45	8,56	69,32	324,01	13,74
Kurtosis	-0,37	2,12	2,69	NA	-3,32	NA	NA	NA
Skewness	1,09	1,41	1,71	NA	-0,60	NA	NA	-1,72
Plage	118,13	69,99	443,93	2,06	15,90	98,03	458,23	24,23
Minimum	1,63	0,09	15,93	30,71	0,09	70,08	1,63	0,09
Maximum	119,77	70,08	459,86	32,77	15,99	168,12	459,86	24,32
Somme	325,32	161,37	700,14	63,49	48,06	238,21	461,50	47,85
Nombre d'échantillons	8	8	5	2	5	2	2	3
Maximum	119,77	70,08	459,86	32,77	15,99	168,12	459,86	24,32
Minimum	1,63	0,09	15,93	30,71	0,09	70,08	1,63	0,09
Niveau de confiance (95.0%)	38,19	19,98	235,24	13,09	10,63	622,84	2911,19	34,13

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Tableau 41 : Descriptions quantitatives de stock AGCO₂ des mangroves estuariennes par espèces et sites caractéristiques

Paramètres statistiques	Espèces			Sites				
	<i>Rhizophora racemosa</i>	<i>Rhizophora harrisonii</i>	<i>Avicennia germinans</i>	ALENAKIRI	COCOBEACH	DONGUILA	MAMBOUMBA	Viil. MOKA
Moyenne	149,24	74,03	513,90	116,50	35,28	437,12	846,86	58,54
Erreur-type	59,28	31,02	310,95	3,78	14,05	179,89	840,85	29,11
Médiane	73,37	53,85	120,28	116,50	57,49	437,12	846,86	86,03
Écart-type	167,67	87,74	695,32	5,34	31,42	254,41	1189,15	50,43
Plage	433,56	256,88	1629,24	7,56	58,37	359,79	1681,71	88,92
Minimum	6,01	0,33	58,47	112,72	0,33	257,22	6,01	0,33
Maximum	439,57	257,22	1687,72	120,28	58,71	617,02	1687,72	89,26
Somme	1193,96	592,26	2569,54	233,01	176,40	874,24	1693,73	175,63
Nombre d'échantillons	8	8	5	2	5	2	2	3
Maximum	439,57	257,22	1687,72	120,28	58,71	617,02	1687,72	89,26
Minimum	6,01	0,33	58,47	112,72	0,33	257,22	6,01	0,33
Niveau de confiance (95.0%)	140,18	73,35	863,35	48,06	39,02	2285,82	10684,07	125,28

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

En définitive, bien que présentes ailleurs, *Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erectus*, *Phoenix reclinata* et *Avicennia germinans* sont une préférence écologique du site de Cocobeach. Il en est ainsi de *Rhizophora harrisonii* qui est une préférence écologique des sites Alénakiri, Donguila, Mamboumba et Alibandeng. *Rhizophora racemosa* quant à lui est plus observable à Oveng, Essassa, Chinchoua, Remboué et Matek-Mavi.

Les petites mangroves sont une caractéristique des sites Essassa, Cocobeach, Matek-Mavi, Moka, Oveng, Alénakiri, Mamboumba Rivière et Alibandeng. Par ailleurs, les grandes mangroves s'observent dans la Remboué, à Donguila, Chinchoua, Mamboumba village et Bolokouboué.

Les facteurs de détermination de stockage de biomasse varient d'une espèce à l'autre. Chez *Rhizophora harrisonii* la capacité de stockage est déterminée par la salinité et l'altitude. Celle de *Rhizophora racemosa* est déterminée par le pH. Par contre, la capacité chez *Avicennia germinans* est fonction de la température et le pHmV.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette recherche visait la mise en place des équations allométriques locales pour estimer de la biomasse aérienne et le stock de carbone aérien des mangroves estuariennes; la combinaison des données de terrain et celles de télédétection afin d'estimer la biomasse aérienne et le stock de carbone aérien des mangroves estuariennes par télédétection d'une part; il était aussi question de déterminer l'espèce de mangrove et estuaire qui stocke le plus de biomasse et de carbone et de déterminer lesquelles des variables environnementales régissent la répartition spatiale de biomasse aérienne et de carbone aérien dans les mangroves estuariennes d'autre part.

De cette étude découle la mise en place de 10 modèles de prédiction au sol, dont 5 modèles de prédiction de volume et 5 modèles de prédiction de biomasse (AGB). Elle a permis aussi la mise en place de 4 modèles de prédiction par télédétection. Notamment, 3 modèles de prédiction des hauteurs et un modèle de prédiction de biomasse (AGB).

Les modèles au sol sont constitués de modèle de volume et de modèle de biomasse (AGB). Les modèles de prédiction de volume sont constitués d'un modèle de type général, un modèle pour *Rhizophora harrisonii*, un modèle pour *Rhizophora racemosa*, un modèle pour *Rhizophora* spp et pour finir un modèle pour *Avicennia germinans*. Le taux de détermination de ces modèles de volume est compris entre 95 et 99 %.

Les équations de prédiction de biomasse sont également constitué d'une équation générale $AGB = 0,0000725D^{2,68}$, d'un modèle pour le *Rhizophora harrisonii* $AGB = 0,0000491D^{2,85}$, d'un modèle pour le *Rhizophora racemosa* $AGB=0,0000464D^{2,85}$, d'un modèle pour le *Rhizophora* spp $AGB=0,000112D^{2,52}$ et d'un modèle pour l' *Avicennia germinans* $AGB = 0,000197D^{2,37}$. Ils ont un taux de détermination de biomasse compris entre 95 et 99% soit, une moyenne de $96 \pm 0,008\%$ et une erreur résiduelle d'ensemble de $0,39 \pm 0,04$.

Toutes ces équations allométrique ont été validées à partir d'une base de données indépendante. Ainsi, l'écart entre la biomasse observée et la biomasse prédite est de -0,17 % pour le modèle (*Avicennia germinans*), de -0,10 % pour le modèle (*Rhizophora harrisonii*) et -0,45 % pour le modèle (*Rhizophora racemosa*). La comparaison des prédictions des modèles *Avicennia germi-*

nans, *Rhizophora harrisonii*, *Rhizophora racemosa* et le modèles de Ajonina et *al.* 2014 est respectivement de -0,87, -0,10 et -0.83 %. Aussi, la différence entre les modèles d'Ajonina 2008 ; Ajonina et *al.* (2014) et les observations terrains est respectivement de 0,17, -0,24, -0,51 % de biais. Les modèles élaborés ici sont dans une gamme de DBH comprise entre 0,7 cm < DBH < 79 cm pour le genre *Rhizophora* et 3 cm < DBH < 78 pour le genre *Avicennia*. En ce sens, ils diffèrent des autres modèles qui étaient couramment utilisés au Gabon par défaut de manque de modèle local : Fromard et *al.*, 1993 ; Komiyama et *al.* 2005 dont le DBH maximum n'atteint pas 50 cm toute espèce confondue.

Pour ce qui est des modèles d'estimation des hauteurs des mangroves par télédétection, les trois modèles mis en place identifient l'estuaire du Komo comme siège des plus hautes mangroves. Le premier modèle ($H = 0,74 * SRTM$) a des estimations de hauteur comprise entre 1 m < H < 31 m avec un taux de détermination de 86 %. Le deuxième modèle ($H = 2,51 * e^{0,068 * SRTM}$) quant à lui a des prédictions de hauteur oscillant entre 2 m ≤ H < 44,7 m avec 73 % de taux de détermination. Enfin les prédictions de hauteur du troisième modèle ($H = SRTM^{0,9095}$) sont entre 1 m ≤ H < 29,9 m avec 80 % de taux de détermination. Le modèle tiré de la littérature (Seanger et *al.* 1993 ; Fatoyinbo et *al.* 2008, 2013) a des prédictions de hauteur allant de 3,8 m ≤ H < 46,6 m. Ces prédictions sont très proches de celles de notre modèle 2 soit, une différence 1,9 m de prédiction maximale de plus que le modèle 2 et 1,71 m de prédiction minimale de moins que le modèle.

Toutefois, les équations de prédiction de la biomasse par télédétection ont un minimum identique de 89 Mg ha⁻¹. Cependant, elles ont des maximums différents de 859 Mg ha⁻¹ pour le modèle établi et 553 Mg ha⁻¹ pour le modèle de Fatoyinbo et *al.* (2008). Les moyennes respectives sont de 406 ± 64 Mg ha⁻¹ et 280 ± 38 Mg ha⁻¹. Rappelons que les estimations de Fatoyinbo et *al.* (2008) sont basées sur le modèle pantropical de Seanger et *al.* 1993. Un modèle pantropical prédit mieux qu'un modèle général, mais il a des prédictions moins précises qu'un modèle local ou spécifique (Husch et *al.* 2003). C'est ce qui justifie la différence des prédictions entre les estimations du présent modèle et celui de Seanger et *al.* (1993).

Entre autres, cette étude a débouché sur la mise en œuvre de 9 modèles de distribution de DBH et sur la détermination de l'infradensité des Rhizophoraceae et d'Avicenniaceae notamment

l'infradensité du bois, de l'écorce et l'infradensité mixte. Nous disposons désormais des infradensités locales du tronc et des racines de *Rhizophora racemosa*, *Rhizophora harrisonii* et *Rhizophora* spp ainsi que de l'infradensité du tronc pour *Avicennia germinans*.

C'est au total, un échantillonnage de 2576 arbres de mangrove qui a été pris en compte dans une superficie de 12012 m² des estuaires Komo, Mondah et Rio Mouni. Les familles rencontrées sont Rhizophoraceae, Combretaceae, Verbenaceae et Arecaceae, notamment les genres *Rhizophora*, *Conocarpus*, *Laguncularia*, *Avicennia* et *Phoenix*. Les espèces rencontrées sont *Rhizophora racemosa*, *Rhizophora harrisonii*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erectus* et *Phoenix reclinata*. Selon l'échantillonnage, l'estuaire du Komo a un stock moyen de 537,207 Mg AGB ha⁻¹ soit, 268,60 Mg AGC ha⁻¹. Celui de la Mondah a 839,594 Mg AGB ha⁻¹ soit, 419,797 Mg AGC ha⁻¹ et le stock de l'estuaire du Rio Mouni est de 19,227 Mg AGB ha⁻¹ soit, 9,6135 Mg AGC ha⁻¹. Pour ce qui est des espèces c'est *Avicennia germinans* qui est en tête avec 1400,298 Mg AGB ha⁻¹ soit, 700,149 Mg AGC ha⁻¹ suivis de *Rhizophora racemosa* qui a 650,657 Mg AGB ha⁻¹ soit, 325,3285 Mg AGC ha⁻¹. Ensuite, viennent *Rhizophora harrisonii*, *Laguncularia racemosa* et enfin *Conocarpus erectus* qui ont respectivement 322,755 Mg AGB ha⁻¹ soit, 161,3775 Mg AGC ha⁻¹; 31,99 Mg AGB ha⁻¹ soit, 15,995 Mg AGC ha⁻¹ et 0,754 Mg AGB ha⁻¹ soit, 0,377 Mg AGC ha⁻¹.

S'agissant des facteurs de répartition spatiale, ils sont variés d'une espèce à l'autre. Ainsi, l'altitude, la salinité et le pH influencent les capacités de stockage de *Rhizophora*, tandis que le pHmV, la pression, l'oxygène dissous et température influence les capacités de stockage pour *Avicennia*. Aussi, les facteurs biogéographiques (géohorizon et géofaciès) jouent également un rôle dans la capacité de stockage de biomasse aérienne. Le *Rhizophora racemosa* a des stocks variés selon qu'il se localise en front de mer, en méso ou en arrière mangrove. De même, l'*Avicennia germinans* a des stocks différents selon qu'il a une petite ou grande taille. L'ensemble des espèces de mangroves identifiées dans cette étude avaient été répertoriées par (Villiers 1973; Lebigre 1983, 1990 ; Ondo Assoumou 2006) dans les estuaires du Komo et de la Mondah et Rio Mouni et dans le delta septentrional de l'Ogooué.

Avec ce modèle d'estimation par télédétection mise en place dans le présent travail, nous pourrions déterminer les mangroves qui ont des stocks importants en milieu périurbain et aider

dans la prise de décision d'aménagement urbain. À partir des modèles de distribution de DBH nous pouvons désormais identifier les zones de mangroves favorables à un aménagement particulier et lié à leurs conservations en milieu urbain.

Les facteurs de répartition de biomasse et de carbone sont différents d'une espèce à l'autre. Aux facteurs classiques de salinité et pH retrouver dans la littérature (Villiers 1973 ; Maruis 1984; Lebigre et al. 1985; Kauffman et al. 2011, 2017 ; Donato et al. 2011) s'ajoute l'altitude pour le genre *Rhizophora* et la pression atmosphérique, pHmv, l'oxygène dissous et la température pour le genre *Avicennia*. Toutefois, ces facteurs de répartition de stock de biomasse et carbone ne sont pas tous les mêmes qui interviennent dans la répartition de ses espèces. Il ressort que l'altitude et la salinité sont très corrélées de même que la température et la pression atmosphérique. Par contre, la pH et pHmV sont opposés. Le *Laguncularia racemosa*, l'*Avicennia germinans*, le *Conocarpus erectus* et le *Phoenix reclinata* ont une localisation spatiale liée à l'altitude et à la salinité. Pourtant d'un point de vue de capacité de stockage de l'AGB et AGC la salinité intervient pour *Rhizophora*. Tout comme la localisation spatiale de *Rhizophora harrisonii* est liée au pH, à la température et à la pression atmosphérique. Néanmoins, la capacité de l'élaboration de biomasse et de stockage de carbone chez *Rhizophora harrisonii* est déterminée par la salinité et l'altitude. Aussi, *Rhizophora racemosa* a une localisation géographique déterminée par l'oxygène dissous et pHmV, pourtant sa capacité d'élaboration de l'AGB et de stockage de l'AGC est liée au pH et dans une moindre mesure à l'oxygène dissous.

Il y'a aussi deux autres facteurs qui interfèrent dans la distribution de la biomasse et de carbone : le géofaciès et le géohorizon. La capacité d'élaboration de biomasse et sa capacité de stockage de carbone d'une espèce varient selon que celle-ci se trouve en front de mer, méso ou arrière mangrove chez le genre *Rhizophora*. De même, que sa hauteur influence également les capacités d'élaboration de biomasse et la capacité de stockage de carbone pour *Avicennia*.

Au vu de ce qui précède, l'hypothèse selon laquelle les équations allométriques spécifiques locales au sol permettent de mieux estimer la biomasse et le stock de carbone aérien des mangroves estuariennes par rapport aux équations générales d'Asie (Komiya et al. 2008) et de Guyane Française (Fromard et al. 1998) est vérifiée. La deuxième hypothèse selon laquelle la combinaison

d'une variable de télédétection aux données de terrain permet d'estimer la biomasse et le stock de carbone aérien des mangroves estuariennes de grandes étendues spatiales est également vérifiée.

La troisième hypothèse est vérifiée partiellement car l'espèce qui stocke de biomasse est l'*Avicennia germinans* et non le plus *Rhizophora racemosa* comme nous l'avions supposé au départ, l'estuaire du Komo est bien celui qui stocke le plus de biomasse. S'agissant quatrième hypothèse référant aux variables environnementales altitude, pH, salinité, température, oxygène dissous, pression atmosphérique et conductivité qui influencent la répartition spatiale de la biomasse. Celle-ci est vérifiée de manière générale, mais avec la précision que toutes ces variables n'influencent pas les mêmes espèces.

Nos objectifs spécifiques ont été atteints. Nous disposons désormais des estimateurs locaux de biomasse et de carbone aussi bien au sol et par télédétection. Aussi, l'étude a confirmé que des modèles locaux de prédiction de biomasse et de carbone sont mieux que des modèles généraux tirés de Guyane Française ou d'Asie qui étaient couramment utilisés dans les mangroves du Gabon (Fromard et al., 1998 ; Komiyama et al., 2005 ; Ajonina et al., 2014 ; Kauffman et al., 2017).

Néanmoins, la biomasse et le carbone du sol, des bois morts au sol et la biomasse racinaire (BGB) n'ont pas été pris en compte dans cette étude. Des recherches doivent se poursuivre dans ce sens. Il sera souhaitable de faire une évaluation de biomasse également dans les mangroves le Delta de l'Ogooué, dans les mangroves des lagunes du sud et dans les mangroves du fleuve Nyanga.

Des recherches devraient également être axées sur l'élaboration des modèles d'estimation de biomasse et des modèles de distribution de toutes les mangroves qui sont proches des centres urbains notamment : Kango, Port-Gentil, Mayumba. Il faudrait également mener des bilans généraux de toutes les mangroves jouxtant les équipements pétroliers : Port-Gentil, Ozouri, Batanga, Gamba et Mayonami et Mayumba. Cela permettrait d'avoir une connaissance initiale de ces mangroves par rapport à leur relation aux villes mais aussi, à leur relation par rapport à l'activité pétrolière.

Aussi, il y'a l'épineux problème lié au statut juridique de la mangrove qui n'est pas résolu. Pour l'instant, il n'existe pas de loi qui soit favorable à la protection de la mangrove dans le code forestier. La mangrove est protégée au Gabon par effet de déduction des textes suivants : Loi n° 016/2001 du Code forestier en République gabonaise (Loi d'orientation en matière des eaux et des forêts). Et la loi n° 003-2007 du 27/08/2007, portant sur les parcs nationaux, les aires protégées et à la protection et l'amélioration de l'environnement (articles 3 alinéa 5). Il y a également le décret n° 001032-PE-MEFEPEPN du 01/12/2004, lié aux modalités de classement et de déclassement des forêts et des aires protégées. Il serait judicieux de mener également des réflexions dans ce sens afin de disposer d'un cadre juridique lié à la mangrove. Cela permettrait de déboucher sur la mise en place d'un observatoire national scientifique des mangroves (ONSM). Celui-ci veillera sur le suivi phytogéographique et éco-biologique de toutes les mangroves sur le territoire national.

BIBLIOGRAPHIE

1. **Adame M. F., B. Fry**, 2016. Source and stability of soil carbon in mangrove and freshwater wetlands of the Mexican Pacific coast, *Wetlands Ecology and Management*, vol 24: p.129-137
2. **Adomou A.C**, 2005. *Les patrons de végétation et gradients environnementaux au Bénin: Implications pour la biogéographie et la conservation*. Thèse de doctorat, Biogéographie, Wageningen University, the Netherland, 135p
3. **Aigbe H. I, Akindele S, Onyekwelu J**, 2013, Volume equations for Oban tropical forest reserves, Cross River State, Nigeria. *Nigerian Journal of Forestry* 43(1) 53-67.
4. **Ajonina et al.**, 2008. Current status and conservation of mangroves in Africa: An overview. *World Rainforest Movement Bulletin* No. 133, p.1-6.
5. **Ajonina G**, 2013. *Établissement du bilan carbone des mangroves des zones humides du Complexe Ouest du Sud-Benin en vue de la préparation d'un projet MDP*, Rapport de consultation dans le cadre du Mécanisme pour un Développement Propre, 79 p. pdf.
6. **Ajonina G, Kairo J, Grimsditch G, Sembres T, Chuyong G, Mibog D.E and Fitzgerald C**, 2014. *Assessment of carbon pools and multiple benefits of mangroves in Central Africa for REDD+*. UNEP, WCMC, CWCS, KMFRI Report. 85 p.
7. **Ajonina, G. N., Ago E. E., Amoussou G., Diyouke Mibog E., Akambi I. D., and Dossa E.**, 2014. Carbon Budget as a Tool for Assessing Mangrove Forests Degradation in the Western, Coastal Wetlands Complex (Ramsar Site 1017) of Southern Benin, West, In *The Land/Ocean Interactions in the Coastal Zone of West and Central Africa, Estuaries of the World*, Springer, p . 139-149.
8. **Ajonina, G. N., Aya F.A., Diame A. , Armah A. K., Camara S., Amegankpoe C., Zabbey N. and Kaya P.**, 2016. Overview of experience of mangrove reforestation in West and Central Africa. *38th Annual Conference of Forestry Association of Nigeria (FAN)*. Conference Paper, March, p. 12-21.
9. **Ajonina, G. N., Kairo J., Grimsditch G., Sembres T., Chuyong G., and Diyouke E.**, 2014. Assessment of Mangrove Carbon Stocks in Cameroon, Gabon, the Republic of Congo (RoC) and the Democratic Republic of Congo (DRC) Including their Potential for Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (REDD+), In *The Land/Ocean Interactions in the Coastal Zone of West and Central Africa, Estuaries of the World*, Springer, p. 177-189.
10. **Ajonina, G.N.** (2008). *Inventory and modelling mangrove forest stand dynamics following different levels of wood exploitation pressures in the Douala-Edea Atlantic coast of Cameroon*,

Central Africa. Mitteilungen der Abteilungen für Forstliche Biometrie, Albert-Ludwigs- Universität Freiburg. 2008- 2. 215 p.

11. **Akendengué Aken I.**, 2016, *Contribution à la conservation d'un espace naturel périurbain : cas de la mangrove du 2ème arrondissement d'Owendo*, Mémoire Master DSAS Géographie, Université Omar Bongo, Libreville, 145 p.
12. **Akendengué Aken I., Ondo Assoumou E., Mombo J.B.**, 2018. Diversité floristique des mangroves de l'enclave Egoumé Ikoy-Komo à Owendo (Gabon), *AHOHO*, Lomé, p. 203-213
13. **Akindele S.O.** and **LeMay V.M.**, 2006. Development of tree volume equations for common timber species in the tropical rain forest area of Nigeria. *Journal of Forest Ecology and Management*. 226: 41-48.
14. **Alongi D.M.**, 2012. Carbon sequestration in mangrove forests, *Carbon Management*, 3:3, p. 313-322, DOI: 10.4155/cmt.12.20, (Consulté le 3/12/2018)
15. **Alongi DM., Murdiyarso D., Fourqurean JW., Kauffman JB., Hutahaean A., Crooks S., Lovelock C., Howard J., Herr D., Fortes M., Pidgeon E., Wagey T.**, 2016. Indonesia's blue carbon: a globally significant and vulnerable sink for seagrass and mangrove carbon. *Wetlands Ecology and Management*, vol 24, p 3-13
16. **Amat J.-P.,** Cœur C. L., Dorize L., 2015. *Eléments de géographie physique*. Paris : Bréal
17. **Anderson, M.J., Ellingsen, K.E. & McArdle, B.H.**, 2006 .Multivariate dispersion as a measure of beta diversity. *Ecology Letters* 9, p. 683–693.
18. **Andriamalala C.A.J.**, 2007. *Étude écologique pour la gestion des mangroves à Madagascar*. Thèse de doctorat, Université de Basel, 285p
19. **Baccini A., Goetz S. J., Walker W. S., Laporte N. T., Sun M., Sulla-Menashe D., Hackler J., Beck P. S. A., Dubayah R., Fried M. A., Samanta S. et Houghton R. A.**, 2012. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Clim Change*. 2, 182-185.
20. **Baccini, A., Laporte, N., Goetz, S.J., Sun, M., Dong, H.**, 2008. A first map of tropical Africa's above-ground biomass derived from satellite imagery. *Environ. Res. Lett.*, 3, p.1-9.
21. **Batjes H., Fischer G., Nachtergaele F.O., Stolbovoy V.S., Van Velthuisen H.T.**, 1997. Estimation of Soil Carbon Gains Upon Improved Management within Croplands and Grasslands of Africa. *Environment Development and Sustainability* 6(1):133-143

22. **Beaud M.**, 1998. *L'art de la thèse : comment préparer et rédiger une thèse de doctorat un mémoire de D.E.A. ou maîtrise ou tout autre travail universitaire*, La découverte, 173 p.
23. **Beaujeu-Garnier J.**, 1971. L'avenir scientifique de la géographie : David Harvey, *Explanation in geography* (1969), In: *Annales de Géographie*, t. 80, n°440, 1971. p. 451-481.
24. **Beroutchachvili N., Radvanyi J.**, 1978. Les structures verticales des géosystèmes. In: *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, tome 49, fascicule 2, 1978. *Géosystème et aménagement*. pp. 181-198
25. **Beroutchachvili Nicolas, Bertrand Georges**, 1978. Le géosystème ou «système territorial naturel». In: *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, tome 49, fascicule 2, 1978. *Géosystème et aménagement*. p. 167-180
26. **Boisson de Chazournes L.**, 1997. La gestion de l'intérêt commun à l'épreuve des enjeux économiques - le protocole de Kyoto sur les changements climatiques. In: *Annuaire français de droit international*, vol 43, p. 700-715
27. **Brand D., Durousset M.**, 2005. *Dictionnaire thématique histoire géographie*. Paris : Dalloz, 561 p.
28. **Briggs S. V.**, 1977. Estimates of biomass in a temperate mangrove community. *Aust. J. Ecol.* 2:369-373
29. **Brown S.**, 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forest : A Primer. *Forest Ressources Assesment Publication ; Forestry Paper* 134, FAO, 55p.
30. **Brown S., Gillespie A.J.R., Lugo A.E.**, 1989 Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest. Science.* 35, 881-902.
31. **Brown S., Schroeder P., Kern, J.S.**, 1999. Spatial distribution of biomass in the forests of the eastern USA. *Forest Ecology and Management* 123:81-90.
32. **Bunge W.**, 1979. Perspective on Theoretical Geography. *Annals of the Association of American Geographers* 69: 169-174.
33. **Cailliez F.**, 1980. *Foest volume estimation and yield prediction*. Vol 1, FAO, 98 p.
34. **Castillo J. A. A., Apan A. A., Maraseni T. N., Salmo S. G.**, 2017. Estimation and mapping of above-ground biomass of mangrove forests and their replacement land uses in the Philippines using Sentinel imagery, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 134: 70-85

35. **Cauvin C.**, 2007 Géographie et mathématique statistique, une rencontre d'un nouveau genre, *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], 18 | 2007, mis en ligne le 03 octobre 2009, consulté le 30 avril 2019: <http://journals.openedition.org/histoire-cnrs/>
36. **Chave J., Andalo C., Brown S., Cairns M.A., Chambers J.Q., Eamus D., Fölster H., Fromard F., Higuchi N., Kira T., Lescure J.P., Nelson B.W., Ogawa H., Puig H., Riéra B., Yamakura T.**, 2005. Allométrie des arbres et estimation améliorée des stocks et du bilan de carbone dans les forêts tropicales. *Oecologia* 145: 87-99
37. **Christensen B.**, 1978. Biomass and primary production of *Rhizophora apiculata*. in a mangrove in southern Thailand. *Aquat. Bot.* 4:43-52
38. **Claval P.**, 1968. William Bunge. Appendix to Theoretical Geography ; Allan Pred. Behavior and Location. Foundations for a Geographic dynamic location theory.. In: *Revue Géographique de l'Est*, tome 8, n°3-4. pp. 389-392
39. **Claval P., Haggett P.**, 1967. Locational Analysis in Human Geography. In: *Revue Géographique de l'Est*, tome 7, n°1-2, pp. 252-254;
40. **Clist B.**,1995. *Gabon : 100 000 ans d'histoire*. Centre Culturel Français (C.C.F.) St Exupéry (Gabon), Collection Sépia, Paris, 380 p.
41. **Clough B.F., Dixon P., Dalhaus, O.**, 1997. Allometric relationships for estimating biomass in multi-stemmed mangrove trees. *Aust. J. Bot.* 45: 1023–1031.
42. **Comley & Mcguinness K.A.**, 2005. Above and below-ground biomass, and allometry of four common northern Australian mangroves. *Australian Journal of Botany*,53, p.431-436.
43. **Constant A.S., Lévy A.**, 2015. *Réussir, mémoire, Thèse et HDR*. Gualino, Mementos Lmd, 192 p.
44. **Cormier-Salem M.C., Chauveau J.-P., Bouju S.**, 1999. L'identité humaine des rivières du Sud : unité historique et situation d'interface. In *Rivière du Sud : Sociétés et Mangroves Ouest Africaine*, IRD. pp. 149-204
45. **Cornen G., P. Giresse, Kouyoumontzakis G. et Moguedet G.**, 1977. La fin de la transgression holocène sur les littoraux atlantique d'Afrique équatoriale et australe (Gabon, Congo, Angola, Sao Tomé, Annobon) rôle eustatique et néotectoniques. *Ass, Sénégal Et. Quarter. Afr., Bull. Liaison, Sénégal n° 50, juin 1977*, p. 53-83

46. **Dandurand J.L., Gout R., Hoefs J., Menschel G., Schott J. et Usdowski E.**, 1982. Kinetically controlled variations of major components and carbon and oxygen isotopes in a calcite-precipitating spring. *Chemical Geology*, 36, 299-315.
47. **Dauphine A. et Voiron-Cannicio C.**, 1988. *Variogramme et structure spatiales*, Montpellier, Reclus, 55p
48. **Deering D. W., Rouse J. W., Haas R. H., and Schell J. A.**, 1975. Measuring "forage production" of grazing units from Landsat MSS data. Proc., "Tenth Int. Symp. on Remote Sensing of Environment" ERIM, *Ann Arbor, Michigan*. 2:1169-1179
49. **Delhumeau M.**, 1969. *Carte pédologique de reconnaissance au 1/200000 : Feuille Libreville-Kango*, ORSTOM, 56p
50. **Direction Générale de la Statistique**, 2015. *Résultats globaux du Recensement Général de la Population et des Logements du Gabon (RGPL-2013)*. Libreville, 195 pages + Annexes.
51. **Dittmar T., Hertkorn N., Kattner G. and Lara R.J.**, 2006. Mangroves, a major source of dissolved organic carbon to the oceans, *Global Biogeochem. Cycles*, 20, p 67-77.
52. **Dobremez J.-F.**, 1996. «Jacques Blondel : Biogéographie. Approche écologique et évolutive». In: *Revue de géographie alpine*, tome 84, n°2, p113 Pdf. www.persee.fr/doc/rga (consulté le 24/01/2017)
53. **Donato, D.C., Kauffman J.B., Murdiyarso D., Sofyan K., Melanie S., and Markku K.**, 2011. Mangrove amongst the most carbon-rich forest in the tropics. *Nature Geosciences* 4(5): 293-297.
54. **Dufrêne, M.**, 1992. *Biogéographie et Écologie des Communautés de Carabidae en Wallonie*. Dissertation doctorale, Ecologie et Biogéographie. Université Catholique de Louvain, 194 pp.
55. **Edou M et Ondo Assoumou E.**, 2011. «La diversité biologique au Gabon: contexte et enjeux », *Annales de l'Université Omar Bongo*, n° 16, p :2-6
56. **FAO**, 2005. *Global Forest Resources Assessment 2005: main report*. FAO Forestry Paper, 10 p.
57. **Fatoyinbo L. Rincon R. Harding D. Gatebe C. Jon Ranson K. Sun G. Dabney P. Roman M.**, 2012. The 2011 Eco3D flight campaign: Vegetation structure and biomass estimation from simultaneous SAR, lidar and radiometer measurements," 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012, pp. 3387-3390.

58. **Fatoyinbo T., Simard M.**, 2013. Height and biomass of mangroves in Africa from ICE-Sat/GLAS and SRTM. *Int. J. Remote Sens.* 34, 668–681.
59. **Fatoyinbo T., Amanda H. A.**, 2010. Remote characterization of biomass measurements: case study of mangrove forests. p66-78. www.researchgate.net
60. **Fatoyinbo T., Feliciano E. A., Lagomasino D., Lee S. K., Trettin C.**, 2017. Estimating mangrove aboveground biomass from airborne LiDAR data: a case study from the zambezi river delta, *Environ. Res. Lett.* in press <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9f03>. 19p
- Fatoyinbo T., Simard M., Washington-Allen R.A., Shugart H.H.**, 2008. Landscape-scale extent, height, biomass, and carbon estimation of Mozambique's mangrove forests with Landsat ETM+ and Shuttle Radar Topography Mission elevation data. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 113(G2).
61. **Feka NZ, Ajonina GN.**, 2011. Drivers causing decline of mangrove in West-Central Africa: a review. *Inter. J. Biodivers. Sci. Ecosyst. Serv. Manag.* 7(3):217-230.
62. **Feller C. et Bernoux M.**, 2008. Historical advances in the study of global terrestrial soil organic carbon sequestration. *Waste Management*, Volume 28, Issue 4, 2008, Pages 734-740
63. **Frampton W., Dash J., Watmough G., Milton E., J.**, 2013. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82, p. 83-92.
64. **Fromard F et Fontes J.**, 1994. *Structure et dynamique des mangroves de la région de Port-Gentil (Gabon). Analyse de l'impact lié à l'activité pétrolière.* Libreville, rapport scientifique à la demande d'Elf-Gabon, 52p
65. **Fromard F., Puig H., Mougouin E., Marty G., Betoulle J.L., Cadamuro L.**, 1998. Structure above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: new data from French Guiana. *Oecologia* 115, 39–53
66. **George P.**, 1970. *Dictionnaire de la géographie*, Paris, Presses universitaires de France, 1970, 448 p.
67. **GIEC**, 2001. *Changements climatiques: Rapport de synthèse. Résumé à l'intention des décideurs*, 37 p.
68. **Giesen W., Wulffraat S., Zieren M., Scholten L.**, 2007. *Mangroveguidebook for Southeast Asia.* Bangkok, Food and Agricultural Organisation & Wetlands International.

69. **Giresse P., 1969.** Essai de sédimentologie comparée des milieux fluvio-marins du Gabon, de la Catalogne et du Sud Cotentin. Thèse Doctorat ès Sci. Nat., Fac. Sc. Caen, n°CNRS : AO 2970, 3 tomes, 760 p.
70. **Giresse P., 1989.** Quaternary seal-level changes on the Atlantic coast of Africa. *In: TOOLEY M.J. et SHENNANI, seal-level changes*, Basil Blackwell, London, pp.249-275.
71. **Giresse P., Malounguila-Nganga D., Moguedet G., 1990.** La succession des paléoenvironnements quaternaires des plateformes continentales du sud du Gabon, du Congo, du Cabinda et du Zaïre (Pléistocène supérieur et Holocène). pp. 71-77, *In : LANFRANCHI R., SCHWARTZ D. (coord.) - Paysages quaternaires d'Afrique Centrale Atlantique*. Editions de l'ORSTOM, Coll. Didactiques, 535 p.
72. **Giresse, 1969.** Sur quelques structures sédimentaires des plages et lagunes du littoral gabonais. *Revue des Travaux de l'Institut des Pêches maritimes*, vol. 30, n° 4, pp. 395-400.
73. **Giresse, P., et Moguedet, G., 1980.** Chronoséquences fluvio-marines de l'Holocène de l'Estuaire du Kouilou et des colmatages côtiers voisins du Congo. -Trav. et Doc. Géog.
74. **Giri et al. Giri C. Ochieng E. Tieszen L. L. Zhu Z. Singh A. Loveland T. Masek J. and Duke N., 2011.** Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data, *Global Ecology and Biogeography*, 6 p.
75. **Glèlè Kakai R., Bonou W., Lykke A. M., 2016.** Approche méthodologique de construction et d'interprétation des structures en diamètre des arbres. *Annales des Sciences Agronomiques 20* :99-112
- Goodchild M. F., 2008.** Theoretical geography (1962): William Bunge. *In Key Texts in Human Geography* (pp. 9-16). SAGE Publications Inc.. <https://doi.org/10.4135/9781446213742.n1>
76. **Greenslade, P. J. M., 1983.** Adversity selection and the habitat templet. *American Naturalist*, 122 : 352- 365.
77. **Grinand C., Maireg L., Vieilledent G., Razakamanarivo H., Razafimbelo T., Bernouxm, 2009.** Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar », *Étude et Gestion des sols, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 54 (2017) 1–14* 16, p :25-34 pdf,www.elsevier.com/locate/jag(Consulté le 23/03/2017)
78. **Groupe Chadule (Chamussy H., Charre J., Dumolard P., Durand M-G., Le Berre M.), 1974,** *Initiation aux méthodes statistiques en géographie*. Masson, coll. Géographie, 192 p.

79. **Gurov R.**, 2007. « Gouvernance locale et planification territoriale et environnement : le cas d'Ottawa », In Ville du Nord Ville du Sud : Géopolitique urbaine acteurs et enjeux, *L'Harmattan Villes et Entreprises*, p :247-252
80. **Haggett P.**, 1965. *Locational analysis human geography*, Londres, Edward Arnold, 339 p.
81. **Herteman M.**, 2008. *Evaluation des capacités bioremédiatrices d'une mangrove impactée par des eaux usées domestiques. Application au site pilote de Malamani, Mayotte*, Thèse de doctorat Université de Toulouse III, 330p.
82. **Huete, A.R.**, 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.* 25: 295-309.
83. **Husch, B., Beers, T.W. and Keuhaw Jr., J.A.**, 2003. *Forest mensuration*, 4th Edition. John Wiley & Sons. 443 pp.
84. **Hutchison, J., Manica, A., Swetnam R., Balmford, A.**, 2014. Spalding, M. Predicting Global Patterns in Mangrove *.Forest Biomass. Conserv. Lett.*, 7: 233-240.
85. **Imbert, D., Rollet, B.**, 1989. Phytomasse aérienne et production primaire dans la mangrove du Grand Cul-de-sac Marine (Guadeloupe, Antilles Françaises) *.Bull. Ecol.* 20 : 27-39.
86. **IPCC**, 2001. *The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
87. **IUCN/UNEP**, 2006. *Shoreline protection and other ecosystem services from mangroves and coral reefs*, World Conservation Monitoring Centre. 33p.
88. **Kairo J.G., Lang'AT S et James G.**, 2013. Conservation and management of mangrove forests in Kenya, Pdf, 7.p, www.oceandocs.org/handle/ktf0069 (Consulté le 23/03/2016)
89. **Kairo J.G.**, 2001. *Ecology and Restoration of Mangrove Systems in Kenya*. Unpublished PhD Dissertation, APNA, Belgium Vrije Universiteit Brussel. 127p
90. **Kairo, J.G., Kiviyatu, B. and Koedam, N.** 2002. Application of remote sensing and GIS in the management of mangrove forests within and adjacent to Kiunga Marine Protected Area, Lamu, Kenya. *Environment, Development and Sustainability*, 4: 153-166.
91. **Kauffman J.B et Donato D.C.**, 2011. *Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests*. Working Paper 86 CIFOR, CIFOR Bogor Indonesia

92. **Kauffman J.B, Bhomia R.K.**, 2017. Ecosystem carbon stocks of mangroves across broad environmental gradients in West-Central Africa: Global and regional comparisons. *PLoS ONE* 12(11), p17.pdf, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187749> (Consulté le 20/03/2018)
93. **Kibet Langat P., Kumar L and Koech R.**,2019. Identification of the Most Suitable Probability Distribution Models for Maximum, Minimum, and Mean Streamflow. *Water*, 11, 734, p.2-24
94. **Kibet Langat P., Kumar L., Koech R., & Ghosh M. K.**, 2019. Monitoring of land use / land-cover dynamic using remote sensing: a case of Tana River Basin, Kenya. p.1-19, *Geocarto International*.
95. **Kirui B., Kairo J.G. and Karachi M.**, 2006. Allometric equation for estimating above ground biomass of *Rhizophora mucronata* Lamk. (Rhizophoraceae) mangroves at Gazi Bay, Kenya. *Westen indian Ocean J.mar.sci.* vol.5.No.1, pp.27-34
96. **Komiyama A., Moriya H., Prawiroatmodjo S., Toma T., Ogino K.**, 1988. Forest primary productivity. In: *Ogino, K., Chihara, M. (Eds.), Biological System of Mangrove*. Ehime University, pp. 97–117
97. **Komiyama A., Ogino K., Aksornkoe S., Sabhasri S.**, 1987. Root biomass of a mangrove forest in southern Thailand. 1. Estimation by the trench method and the zonal structure of root biomass. *J. Trop. Ecol.* 3, 97–108
98. **Komiyama A., Ong J. E., and Pongparn S.**, 2008. Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany* 89:128–137.
99. **Komiyama A., Pongparn S., Kato S.**, 2005. Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves. *J Trop Ecol* 21:471-477
100. **Kramer P.J.**, 1981. Carbon Dioxide Concentration, Photosynthesis, and Dry Matter Production *BioScience*, vol. 31, Issue 1, p. 29–33, <https://doi.org/10.2307/1308175>
101. **Lacoste Y.**, 2003. *De la géopolitique aux paysages : dictionnaire de géographie*. Paris : Armand Colin, 413 p.
102. **Laffoley et Grimsditch**, 2009. The management of natural coastal carbon sinks. *IUCN, Gland, Switzerland*. 53 pp
103. **Lana M, Brandão CFL S., Péllico Netto S., Marangon LC., Retslaff FA de S.**, 2013 Distribuição diamétrica de *Eschweilera ovata* em um fragmento de floresta ombrófila densa - Igarassu, PE. *Floresta*, 43(1): p59-68.

104. **Lang'at J. K. S., Bosire J. O., Karachi M., & Kairo J. G.,** 2009. "Allometric models for estimating standing volume of a replanted mangrove plantation in Kenya", Conference paper; Book chapter: Recent advances in forestry research for environmental conservation, improved livelihood and economic development. *Proceedings of the 4th KEFRI Scientific Conference*, KEFRI Headquarters, Muguga, Kenya, 6 to 9 October 2008, p.117-126.
105. **Langner A., Achard F. et Grassi G.,** 2014. Can recent pantropical biomass maps be used to derive alternative Tier 1 values for reporting REDD+ activities under UNFCCC? *Environ. Res. Lett.*, 9(12), 124008.
106. **Lebigre J.-M. et Maruis C.,** 1985. Etude d'une séquence mangrove-tanne en milieu équatorial, Baie de la Mondah (Gabon.) *ORSTOM, CEGET, Travaux et Documents de Géographie Tropicale*, n°51, p.134-146.
107. **Lebigre J.-M.,** 1980. Les mangroves du Gabon : un milieu méconnu et potentiellement riche. *Revue Gabonaise d'études politiques, économiques et juridiques*, n°4, p.37-42.
108. **Lebigre J.-M.,** 1983. *Le littoral du Gabon : aspects géomorphologiques et biogéographiques*, IPN, Libreville-Gabon, 58p.
109. **Lebigre J.-M.,** 1983. Les mangroves des rias du Littoral Gabonais : un essai de cartographie typologique. *Revue Bois et Forêt des tropiques*, n° 119, p :3-28
110. **Lebigre J.-M.,** 1990. *Les marais du Gabon et de Madagascar : contribution géographique à l'étude d'un milieu naturel tropicale*, Thèse de doctorat d'Etat en Géographie tropicale. Université de Bordeaux III, 651p.
111. **Lebigre J.-M.,** 1994. Un exemple de crise de l'environnement : la déforestation et la dégradation des écosystèmes littoraux aux Philippines. In : "*Enregistreurs et indicateurs de l'évolution de l'environnement en zone tropicale*", Talence, Presses Universitaires de Bordeaux, Coll. Espaces tropicaux n° 13, p : 309-330
112. **Lebigre J.-M.,** 1997. Problèmes d'érosion dans les marais à mangrove de Mayotte (archipel des Comores). *Travaux du Laboratoire de Géographie Physique Appliquée*, 15, p45-58.
113. **Leblond A.,** 2011. *Contribution à la réalisation des plans de gestion des îlets Kahouanne, Tête à l'Anglais et Pigeon*, Mémoire, Université des Antilles et de la Guyane, 144p.
114. **Legendre P. & Gallagher, E.D.,** 2001 .Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecologia* 129, p. 271–280.
115. **Legendre P., Legendre L.,** 1998. *Numerical Ecology*. Second english edition: p 274-302

116. **Leopold A.**, 2012. *Dynamique du carbone au sein des mangroves quantification spatio-temporelle des flux de CO₂ aux interfaces sol-air et eau-air*, Thèse de doctorat, Sciences de la Terre et de l'Environnement, Université de la Nouvelle Calédonie, 214p.
117. **Leveque C et Mounolou J.-C.**, 2008. *Biodiversité : Dynamique biologique et conservation*, 2e édition. Paris, Dunod. 259p.
118. **Lévy J. et Lussault M.**, 2003. *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*, Belin, 1034 P.
119. **Loubota Panzou G.J., Doucet J.-L., Loumeto J.-J., Biwole A., Bauwens S., Fayolle A.**, 2016. Biomasse et stocks de carbone des forêts tropicales africaines (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2016 20(4), 508-522
120. **Mac Arthur, et Wilson**, 1967. *The theory of island biogeography*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey. 203p.
121. **Mac Intosh Dashton E. C.**, 2005. *Principe pour un code de conduite de la gestion et de l'utilisation durable des écosystèmes de mangroves*. Rapport de la Banque Mondiale, Washington DC, pdf, 113p. <http://www.worldbank.org>, (consulté le 12/08/2014)
122. **Maia Santos L. C., Bitencourt M, D.**, 2016. Remote sensing in the study of Brazilian mangroves: review, gaps in the knowledge, new perspectives and contributions for management, *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada*, 16(3):245-261.
123. **Maley J.**, 1996. Le cadre paléoenvironnemental des refuges forestiers africains : quelques données et hypothèses. in *The Biodiversity of African Plants*, L.J.G. Van der Maesen & al. eds, Kluwer Acad. Publ., 519-535.
124. **Maloba Makanga J.- D.**, 2004. Climat, In : *Atlas de l'Afrique, Gabon*, Éditions Jeune Afrique, pp. 12-13.
125. **Maloba Makanga J.-D.**, 2011. *Les précipitations au Gabon : climatologie analytique en Afrique*, L'Harmattan, 143p.
126. **Martin C.**, 2008. Locational analysis in human geography (1965): Peter Haggett. 10.4135/9781446213742.n2.
127. **Maruis C.**, 1984. *Mangroves du Sénégal et de la Gambie : écologie-pédologie-géochimie, mise en valeur et aménagement*, Thèse de doctorat, Ecologie-Pédologie-Géochimie. Université Pasteur, p 290

128. **Matagne P.**, 2003. Aux origines de l'écologie, pdf, p.27-42 *Cairn.info*, <http://www.cairn.info/revue-innovations-2003-2-page-27.htm>, (consultée le 01/11/2016)
129. **Mayer, D. G. and Butler. D. G.**, 1993. Statistical validation. *Ecol. Model.* 68:21-32.
130. **Menie Ovono Z.**, 2010. *Évolution de la flèche mandji de l'holocène à l'actuel analyse et cartographie du risque côtier*, Thèse de doctorat en Géomorphologie du Littoral, Université de Nantes, 300p.
131. **MINISTERE DES EAUX ET FORETS**, 2014. *Code Forestier de la République Gabonaise*, 418.p
132. **Mitchard E.T.A. and Flintrop C.M.**, 2013. Woody encroachment and forest degradation in sub-Saharan Africa's woodlands and savannas 1982–2006, *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences*, 7pp.
133. **Mitchard E.T.A., Saatchi S. S., White L. J. T., Abernethy K. A., Jeffery K. J., Lewis S. L., Collins M., Lefsky M. A., Leal M. E., Woodhouse I. H. et Meir P.**, 2012. Mapping tropical forest biomass with radar and space borne LiDAR in Lopé National Park, Gabon: overcoming problems of high biomass and persistent cloud. *Biogeosciences*, 9(1), 179- 191.
134. **Mitra A., Zeman S.**, 2014. *Carbon sequestration by coastal floral community*.New Delhi: TERI. 412p
135. **Mombo J. B.**, 2011. Eléments de géographie physique des zones humides côtières du Gabon. *Revue Ahoho*, n°6, juin 2011, pp. 202-221.
136. **Mombo J.-B. et Edou M.**, 2007. Assainissement et exposition urbaine au Gabon, *Ville en parallèle : villes du Gabon*, n° 40-41, pp. 197-226.
137. **Mombo J.-B.**, 1991. *La côte à ria du Gabon septentrional du Komo au Rio Mouni : Cadre physique et morphologie littorale*, Thèse de doctorat, Géographie tropicale, Université Bordeaux III, 311p.
138. **Mombo J.-B., Itongo M.-T.**, 2011 2011. Gestion du site et risques naturels à Libreville, *Revue Gabonica*, n° 5, revue du CERGEP, 21 p.
139. **Mombo JB., Mouyalou V.M.T. et Fattal P.**, 2017. Stabiliser le trait de côté, un enjeu majeur pour le Gabon : l'exemple du littoral nord de Libreville", in Pottier P., Menié Ovono Z., Faure FE. et Bignoumba G.S., Les régions littorales du Gabon. Eléments de réflexion pour une planification stratégique du territoire. LETG-Géolittomer (Nantes) et Raponda-Walker (Gabon), ed. ; p. 221-241.

140. **Monkhouse, 1965** [Monkhouse, F.J. A., *Dictionary of Geography*. Chicago, Aldine Publishing Company, 1965. 344 p.
141. **Moundounga Mavouroulou Q.**, 2012 *Développement des équations allométriques afin d'estimer les stocks de carbone séquestrés dans la forêt primaire du nord-est du Gabon, Afrique centrale*. USTM Biologie et Population des Écosystèmes.38 p.
142. **Moundounga Mavouroulou Q., Ngomanda A., Engone Obiang N. L., Lebamba J., Gomat H., Mankou G. S., Loumeto J., Midoko Iponga D., Kossi Ditsouga F., Zinga Koumba R., Henga Botsika Bobé K., Lépengué N., Mbatchi B., Picard N.**, 2014. How to improve allometric equations to estimate forest biomass stocks? Some hints from a central African forest, *Canadian Journal of Forest Research*, 10.1139/cjfr-2013-0520, 44, 7, p685-691.
143. **Mounganga M.-D.**, 2006. Les inondations à Libreville: problèmes de pauvreté ou mauvaise occupation des sols? *Revue de l'IRSH*, vol 9-10, LA PAUVRETE.2006. p.113 - 127
144. **Murdiyarso D., Donato D., Kauffman J. B., Kurnianto S., Stidham M. and Kanninen M.**, 2009. *Carbon storage in mangrove and peatland ecosystems: a preliminary account from plots in Indonesia*. Center for International Forestry Research, CIFOR Working Paper48, 37p.
145. **Murphy A.B.**, 2007. Les leçons de lutte de Portland pour limiter l'expansion urbaine, *In Ville du Nord Ville du Sud : Géopolitique urbaine acteurs et enjeux*. L Harmattan Villes et Entreprises, p.225-243
146. **Návar-Chaidez J.**, 2011. The spatial distribution of aboveground biomass in tropical forests of Mexico, *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13. p: 149 - 158
147. **Ndour N., Dieng S. et Mamadou F.**, 2012. « Rôle des mangroves, modes et perspectives de gestions au Delta de Saloum (Sénégal) », pdf, 15p. [*Vertigo*], revue électronique en science de l'environnement, Vol 11, n°3, 2012. URI : <http://id.erudit.org/iderudit/101502ar>, (consulté le 11/01/2016)
148. **Ndour N., Sambou B., & Dasylyva M.**, 2014. Elaboration de tarifs de cubage pour le genre *Rhizophora* au Delta du Saloum (Sénégal). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 8(5), 2155-2173.
149. **Ngomanda A., Obiang N.L.E, Lebamba J., Mavouroulou Q.M., Gomat H., Mankou G.S., Loumeto J., Iponga D.M., Ditsouga F.K., Koumba R.Z., Botsika-Bobe K.H., Okouyi C.M., Nyangadouma R., Lepengue N., Mbatchi B. and Picard N.**, 2014. Site-specific versus

pan-tropical allometric equations: Which option to estimate the biomass of a moist central African forest? *For. Ecol. Manage.* 312, 1–9

150. **Niasse M., Afouda A., Amani A.**, 2004. *Réduire la Vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification. Eléments de stratégie régionale de préparation.* UICN, Gland (Switzerland) & Cambridge (UK), 71 pp

151. **Nicholas R.A., Jachowski M., Quak S.Y., Daniel A., Duangnamon F. D., Edward L. Webb A. Ziegler D.**, 2013. Mangrove biomass estimation in Southwest Thailand using machine learning, *Applied Geography* 45, p311-321

152. **Nkoue G.R.**, 2008. *Le cycle du carbone en domaine tropical humide : exemple du bassin versant forestier du nyong au sud cameroun*, Thèse de doctorat des universités de Toulouse et de Yaoundé 1. 279p

153. **Nusbaumer L.**, 2003. *Structure et composition floristique de la Forêt Classée du Scio (Côte d'Ivoire)*, Thèse de doctorat université de Genève, 150p.

154. **Obame Engone J.P.**, 2015. *Structure spatiale et dispersion des communautés d'arbres en forêt tropicale humide du Gabon : rôle des facteurs édaphiques et du gradient de chablis.* Thèse de doctorat, Sciences Forestières, Université Laval, Québec, 149 p.

155. **Okanga-Guay M., Ondo Assoumou E., Akendengue Aken I., Mpie Simba C., Mombo J.B. Obiang Ebanega M., Mbadinga M., Rogombe L., Mouketou-Tarazewicz D.**, 2019. «Suivi des changements spatiaux et environnementaux dans les mangroves de la province de l'Estuaire du Gabon ». *Actes de la Conférence : Des images satellites pour la gestion durable des territoires en Afrique*, Mertens B. Orekan V. Eds, Cotonou, Bénin, p. 313-339. [hal-02189534]

156. **Oksanen J.**, 1983 .Ordination of boreal heath-like vegetation with principal component analysis, correspondence analysis and multidimensional scaling. *Vegetatio* 52, 181–189.

157. **Ondo Assoumou E.**, 2006. *Dynamiques des paysages végétaux du littoral centre ouest du Gabon autour de Port-Gentil: Approche spatiale et analyse des données de terrain*, Thèse de doctorat en Biogéographie, Montpellier III, 350p.

158. **Ondo Assoumou E.**, 2011. « Risques environnementaux dans les milieux de mangrove au Gabon ». *Gabonica* n°5, Novembre (Revue du CERGEP), p.5-18

159. **Ondo Assoumou E.**, 2017. Les paysages végétaux du littoral gabonais. Pottier P., Menie Ovono Z., Faure F. E. et Bignoumba G. S., « *Les régions littorales du Gabon. Eléments de réflexion pour une planification stratégique du territoire.* »; LETG-Nantes Géolittomer et Raponda-Walker, p. 41-53.
160. **Ong J.E., Gong W.K., Wong C.H.**, 2004. Allometry and partitioning of the mangrove, *Rhizophora apiculata*. *Forest Ecology and Management*, vol. 188(1), February 2004 : 395-408. DOI: [10.1016/j.foreco.2003.08.002](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.08.002)
161. **ONU-Habitat.**, 2017. Rapport régional de la Conférence des Nations Unies sur le logement et le développement urbain durable (Habitat III) pour l’Afrique : innovations en matière de logement et de développement urbain durable en Afrique. Quito en Équateur du 17–20 octobre 2016. 52 p.
162. **Pachauri R.K. et Reisinger A.**, 2008. *Bilan 2007 des changements climatiques: Rapport de synthèse*: GIEC, 114 p.
163. **Pagès J.** 2004. Analyse factorielle de données mixtes. *Revue de Statistique Appliquée* LII(4) :p 93-111.
164. **Péguy Ch.-P.**, 1957, *Eléments de statistique appliquée aux sciences géographiques* (Géographie physique et géographie humaine), C.D. U., 201 p.
165. **Péguy Ch.-P.**, 1948. Introduction à l'emploi des méthodes statistiques en géographie physique, In: *Revue de géographie alpine*, tome 36, n°1, 1948. pp. 7-10
166. **Perry C. R., et Lautenschlager L. F.**, 1984. Functional equivalence of spectral vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 14:169-182.
167. **Peyrot B.**, 1983. Interprétation géomorphologique du littoral et de la façade maritime de la République populaire du Congo. pp. 76-98, In : *Travaux et Documents de Géographie Tropicale, Géomorphologie littorale*, Centre d'Etudes de Géographie Tropicale, n° 49, C.N.R.S., 147 p.
168. **Peyrot B., Clist, B.-O., & Oslisly, R.**, 1990. Le gisement des “Sablières” de Libreville: étude géomorphologique et archéologique d’un site préhistorique de l'estuaire du Gabon. *L'Anthropologie*, 94(3), 483–498.
169. **Picard N., Saint-André L., Henry M.**, 2012. *Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres: de la mesure de terrain à la prédiction*. FAO et Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Rome, Montpellier, 220 pp.

170. **Pottier P. et Menie Ovono Z.**, 2017. « Introduction générale ». Pottier P., Menie Ovono Z., Faure F. E. et Bignoumba G. S., « *Les régions littorales du Gabon. Eléments de réflexion pour une planification stratégique du territoire.* »; LETG-Nantes Géolittomer et Raponda-Walker, éd.; p. 17-25.
171. **Pouquet J.**, 1966. *Initiation à la géopédologie*. SEDES, Paris, 267p.
172. **Putz F.E., Chan H.T.**, 1986. Tree growth, dynamics, and productivity in a mature mangrove forest in Malaysia. *Forest Ecology and Management* 17: 211-230.
173. **Rabenkogo N.**, 1998. Aujourd'hui les mangroves du Gabon. In *le cri du pangolin* n°19 p.9
174. **Rabenkogo N.**, 2007. *Le littoral Nkomi (Gabon) : contribution géographique à la conservation des milieux naturels*. Thèse de doctorat : Géographie et Aménagement de l'Espace, Université de Montpellier II, 307p.
175. **Racine J.-B., Reymond H.**, 1973. *L'analyse quantitative en géographie*, Paris, PUF, coll. Sup, 316.
176. **Ramade F.**, 2005. *Élément d'écologie, Écologie appliquée*. Dunod, 864p.
177. **République Gabonaise**, 1971 - Plan minéral - Min. Mines Libreville, 298 p. (partie principale) + 1 carte coul. h.t.
178. **RGPL**, 2013. *Recensement général de la population et des logements du Gabon*. 247p
179. **Richardson A. J., Wiegand C. L.**, 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering And Remote Sensing*, Vol. 43, n°. 12, December 1977, p. 1541-1552.
180. **Rossier P.**, 1953, *Géographie mathématique*. S.E.D.E.S., coll. Esprit et Méthode, 198 p.
181. **Rouse J. W., & Haas R. H.**, 1973. Monitoring vegetation systems in the great plain with ERTS. *Third ERTS Symposium*, vol. 1 (pp. 309–317). Washington, DC: NASA.
182. **Rubin B.D., Manion P.D. et Faber-langendoen D.**, 2006. Diameter distributions and structural sustainability forests. *Forest Ecology and Management*, 222: 427-438.
183. **Rue O.**, 1998. *L'aménagement du littoral de Guinée : mémoires de développement pour de nouvelles initiatives*, L'Harmattan, 311p.
184. **Saatchi S.S., Harris N.L., Brown S., Lefsky M., Mitchard E., Salas W., Zutta B., Buermann W., Lewis S., Hagen S., Petrova S., White L., Silman M., Morel A.**, 2011. Benchmark Map of Forest Carbon Stocks in Tropical Regions Across Three Continents. *Proc. Nat. Acad. Sci. Vol.108 no. 24 pp. 9899-9904*

185. **Saenger P., Snedaker S. C.**, 1993. Pantropical trends in mangrove aboveground biomass and annual litterfall, *Oecologia*, 96(3), 293-299.
186. **Saint-Vil J.**, 1981. « Les grands bassins fluviaux du Gabon ». *Annales Université Nationales*. Libreville, n°3, p.81-129.
187. **Sanders L.**, 1989. Géographie quantitative et analyse spatiale : quelles formes de scientifi-
tés? In *Thierry Martin. Les sciences humaines sont-elles des sciences?*, Vuibert, 2011, 17p.
188. **Sanders L.**, 1989. *L'analyse des données appliquée à la géographie*, Montpellier, G.I.P. RECLUS, 268p
189. **Sanders L.**, 1995. Géographie et statistique In *Encyclopédie de géographie, Economica*, p. 251-277.
190. **Saur F.**, 2012. *Géographie physique*, Paris : PUF, 295 p.
191. **Schlesinger W.H., Melack J.M.**, 1981. Transport of organic carbon in world's rivers. *Tellus*, 33: 172-187.
192. **Seanger et Snedaker**, 1993. Pantropical trends in mangrove above-ground biomass and annual litterfall, *Oecologia*, vol. 96, no. 3, pp. 293-299
193. **Simard M., Fatoyinbo L., Smetanka C., Rivera-Monroy V. H., Castañeda-Moya E., Thomas N., Van der Stocken T.**, 2019. Mangrove canopy height globally related to precipitation, temperature and cyclone frequency, *Nature Geoscience* 12 (1): 40-45
194. **Simart M., Rivera-Monroy V.H., Mancera-Pineda J.E., Castañeda-Moya E., Twilley R.R.**, 2008. A systematic method for 3D mapping of mangrove forests based on Shuttle Radar Topography Mission elevation data, ICESat/GLAS waveforms and field data: Application to Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia, *Remote Sensing of Environment*, 112(5):2131-2144
195. **Slim F.J., Gwada P., Kodjo M., Hemminga M.A.**, 1996. Biomass and litterfall of *Ceriops* and *Rhizophora* in mangrove forest of Gazi Bay Kenya. *Marine and Freshwater Ressources* 47:999-1007
196. **Smith G. M., Spencer T., Murray A. L., et French J. R.**, 1998. Assessing seasonal vegetation change in coastal wetlands with airborne remote sensing: An outline methodology, *Mangroves Salt Marshes*, 2(1), p15-28.
197. **Sochava V.B.**, 1972. L'étude des géosystèmes : stade actuel de la géographie physique complexe. Izyestija Akademii Nauk SSSR. *Seriya geograficeskaja*, 1972, n° 3, pp. 18-21. Traduction

française (par Cl. Rondeau), CNRS. Centre de Documentation et de cartographie géographique, Paris.

198. **Spalding M., Kainuma M., & Collins L.**, 2011. *Atlas Mondial des Mangroves* : Communiqué de parution. 2p. www.researchgate.net

199. **Steinke T. D., Ward C. J., Rajh A.**, 1995. Forest structure and biomass of mangrove in the Mgeni estuary, South Africa. *Hydrobiologia* 295: 159-166.

200. **Tamai S, Nakasuga T, Tabuchi R, Ogino K.**, 1983. Ecological studies of mangrove forests in southern Thailand: Standing structure and biomass. *Mangrove ecology in Thailand. Bulletin of the Thai-Japanese Co-operative Research Project on Mangrove Productivity and Development* 1981-1982, pp. 3-15

201. **Thiam, Thiam S., Sambou B, Mbow C. et Guisse A.**, 1994. Élaboration de modèles allométriques d'Acacia Sénégal L. Willd pour l'analyse du carbone ligneux en milieu sahélien : cas de la zone sylvo pastorale au Sénégal, *Afrique SCIENCE* 10(3), p.304 – 315.

202. **Thiéblemont D.**, 2009. Cartes géologiques et des ressources minérales de la république Gabonaise au 1/1000000

203. **Tiwari A. K., Singh J. S.**, 1984 .Mapping forest biomass in India through aerial photographs and nondestructive field sampling. *Applied Geography*, 4 (2). pp. 151-165 Trop. n° 39, Talence C.E.G.E.T., pp. 21-48.

204. **Trouy M-C.**, 2015 Anatomie du bois : Formation, fonctions et identification. Collection Synthèses Éditions Quæ, 184 pp.

205. **Twilley R. R.**, 1985. Exchange of organic carbon in basin mangrove forests in a southwest Florida estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 20:543-557.

206. **UNEP**, 2007. UNEP (2007). Mangroves of Western and Central Africa. UNEP-Regional Seas Programme/UNEP-WCMC, 88pp. <http://www.unep-wcmc.org/resources/publications/>

207. **Villiers J-F.**, 1973. « Etude floristique et phytosociologique d'une mangrove atlantique sur substrat rocheux du littoral gabonais ». *Ann. De la Fac. du Cameroun*, n° 14 pp. 3-46.

208. **Winarso G., Vetrita Y., Purwanto A D., Anggraini N., Darmawan S., Yuwono D.M.**, 2015. Mangrove above ground biomass estimation using combination of landsat 8 and alos palsar data. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences* Vol. 12 No. 2 December 2015: 85-96.

209. **Woodroffe C.D.**, 1985. Studies of a mangrove basin, Tuff Crater, New Zealand: I. Mangrove biomass and production of detritus. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 20 (3): 265-280.

ANNEXES

Annexe 1

Planche photo: Matériels utilisés pour la collecte des données

Photo 1 : mètre ruban



Photo 2 : mètre pliable et planche à dessin



Photo 3 : Fiche de collecte et clé d'identification des espèces



Photo 4 : GPS



Photo 5 : Boussole de précision



Photo 6 : Multiparamètre



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Tableau 1: Abondance de quelques sites et espèces

	<i>Rhizophora harrisonii</i>	<i>Rhizophora racemosa</i>	<i>Avicennia germinans</i>	<i>Laguncularia racemosa</i>	<i>Conocarpus erectus</i>	<i>Phoenix reclinata</i>	AGB	AGC	Estuaire	Localisation	Taille
DONGUILA	150	0	28	0	0	0	476.43	238.21	Komo	Méso mangrove	Grande
MATEK	0	203	0	0	0	0	13.50	6.75	Komo	Front de mer	Petite
ALENAKIRI	0	186	0	0	0	0	66.16	33.08	Komo	Arrière mangrove	Petite
TOTAL	150	389	28	0	0	0	556.09	278.04			
MAMBOUMBA.M	18	91	53	51	3	2	57.96	28.98	Mondah	Arrière mangrove	Moyenne
BOLOKOUBOUE	59	0	0	0	12	30	239.55	119.77	Mondah	Front de mer	Moyenne
OVENG	303	0	0	0	0	0	4.38	2.19	Mondah	Arrière mangrove	Petite
ESSASSA	0	203	0	0	3	0	24.17	12.09	Mondah	Méso mangrove	Petite
ALIBANDENG	139	0	0	0	0	0	4.12	2.06	Mondah	Arrière mangrove	Petite
TOTAL	519	294	53	51	18	32	330.18	165.09			
TOTAL	669	683	81	51	18	32	886.27	443.14			
TOTAL				1534							

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Annexe 2

Tableau 2: Résumé statistique de stock de l'AGB par géofaciès

Estuaires	Komo	Rio Mouni	Komo	Mondah	Mondah	Komo
Critères	Komo		Mondah		Komo	
	Arrière mangrove	Front de mer	Méso mangrove	Arrière mangrove	Front de mer	Méso mangrove
Moyenne	63,49	19,22	238,21	461,50	31,90	123
Erreur-type	2,06	7,65	98,03	458,23	15,86	77,8
Médiane	63,49	31,33	238,21	461,50	46,88	123
Écart-type	2,91	17,12	138,64	648,03	27,48	110,02
Kurtosis	NA	-3,32	NA	NA	NA	NA
Skewness	NA	-0,60	NA	NA	-1,72	NA
Plage	4,12	31,81	196,07	916,46	48,46	155,6
Minimum	61,43	0,18	140,17	3,27	0,18	45,2
Maximum	65,55	31,99	336,25	919,73	48,64	200,8
Somme	126,98	96,13	476,42	923,01	95,71	246
d'échantillons	2	5	2	2	3	2
Maximum	65,55	31,99	336,25	919,73	48,64	200,8
Minimum	61,43	0,18	140,17	3,27	0,18	45,2
Niveau de confiance (95.0%)	26,19	21,26	1245,68	5822,38	68,27	988,54

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Annexe 3

Tableau 3: Résumé statistique de stock de l'AGC par géofaciès

Estuaires	Komo	Rio Mouni	Komo	Mondah	Mondah	Komo
Critères	Komo		Mondah		Komo	
	Arrière mangrove	Front de mer	Méso mangrove	Arrière mangrove	Front de mer	Méso mangrove
Moyenne	31,74	9,61	119,10	230,75	15,95	61,5
Erreur-type	1,03	3,82	49,01	229,11	7,93	38,9
Médiane	31,74	15,66	119,10	230,75	23,44	61,5
Écart-type	1,45	8,56	69,32	324,01	13,74	55,01
Kurtosis	NA	-3,32	NA	NA	NA	NA
Skewness	NA	-0,60	NA	NA	-1,72	NA
Plage	2,06	15,90	98,03	458,23	24,23	77,8
Minimum	30,71	0,09	70,08	1,63	0,09	22,6
Maximum	32,77	15,99	168,12	459,86	24,32	100,4
Somme	63,49	48,06	238,21	461,50	47,85	123
d'échantillons	2	5	2	2	3	2
Maximum	32,77	15,99	168,12	459,86	24,32	100,4
Minimum	30,71	0,09	70,08	1,63	0,09	22,6
Niveau de confiance (95.0%)	13,09	10,63	622,84	2911,19	34,13	494,27

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

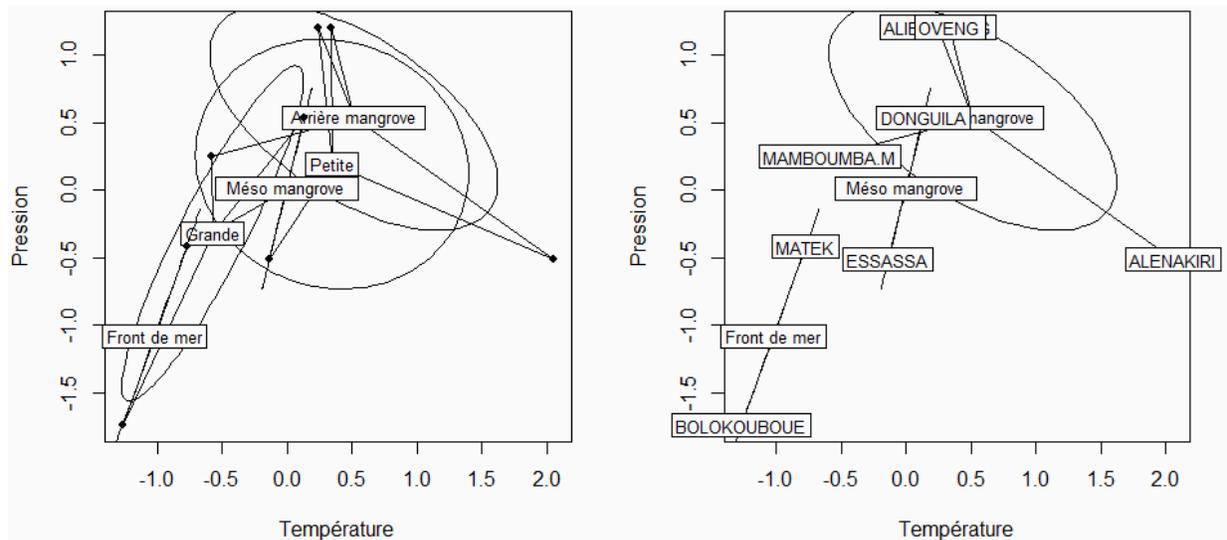
Annexe 4

Tableau 4: Résumé statistique de stock de l'AGCO² par géofaciès

Estuaires	Komo	Rio Mouni	Komo	Mondah	Mondah	Komo
Paramètres statistiques	Arrière mangrove	Front de mer	Méso mangrove	Arrière mangrove	Front de mer	Méso mangrove
Moyenne	116,50	35,28	437,12	846,86	58,54	225,70
Erreur-type	3,78	14,05	179,89	840,85	29,11	142,76
Médiane	116,50	57,49	437,12	846,86	86,03	225,70
Écart-type	5,34	31,42	254,41	1189,14	50,43	201,89
Plage	7,56	58,37	359,79	1681,70	88,92	285,52
Minimum	112,72	0,33	257,22	6,01	0,33	82,94
Maximum	120,28	58,71	617,02	1687,72	89,26	368,46
Somme	233,01	176,40	874,24	1693,73	175,63	451,41
Nombre d'échantillons	2	5	2	2	3	2
Maximum	120,28	58,71	617,02	1687,72	89,26	368,46
Minimum	112,72	0,33	257,22	6,01	0,33	82,94
Niveau de confiance (95.0%)	48,06	39,02	2285,82	10684,07	125,28	1813,97

Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

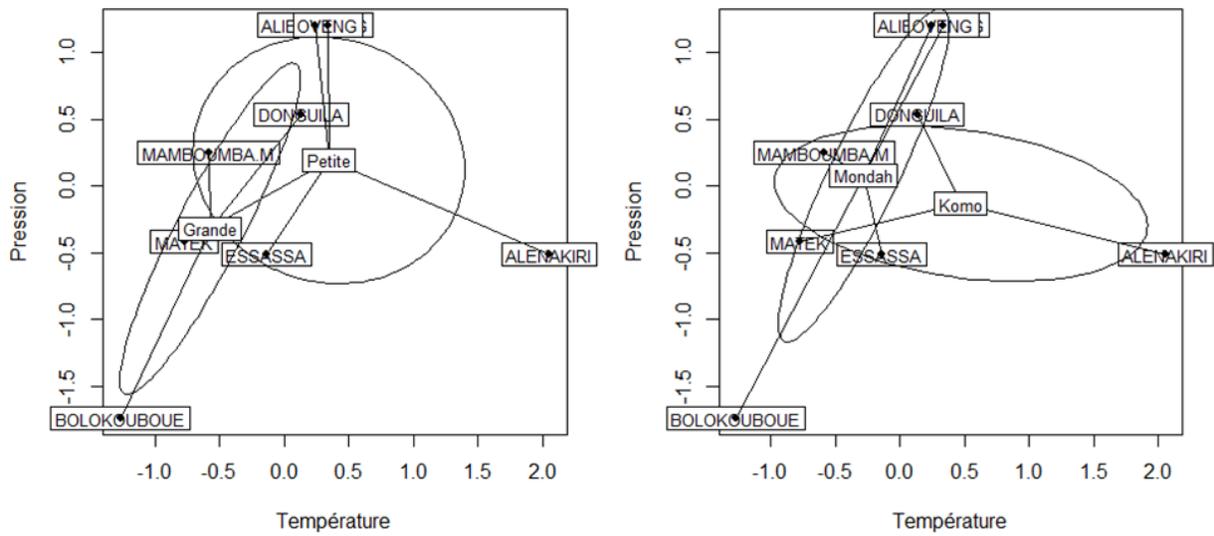
Figure 1: Influence de la pression atmosphérique et de la température en des critères biogéographique



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

Annexe 5

Figure 2: Influence de la pression atmosphérique et de la température en des critères biogéographique et géographique



Réalisation : Igor Akendengué Aken, 2020.

ILLUSTRATIONS

Liste des graphiques

GRAPHIQUE 1 : APPRECIATION DU MODELE DE DISTRIBUTION DE DBH DES MANGROVES ESTUARINES.....	125
GRAPHIQUE 2 : APPRECIATION DU MODELE DE DISTRIBUTION DE DBH DES MANGROVES D'ALENAKIRI	131
GRAPHIQUE 3 : APPRECIATION DU MODELE DE DISTRIBUTION DE DBH DES MANGROVES D'ALENAKIRI	135
GRAPHIQUE 4: APPRECIATION DU MODELE DE DISTRIBUTION DE DBH DES MANGROVES D'OVENG	139
GRAPHIQUE 5 : APPRECIATION DU MODELE DE DISTRIBUTION DE DBH DES MANGROVES DE MAMBOUMBA VILLAGE	143
GRAPHIQUE 6: APPRECIATION DU MODELE DE DISTRIBUTION DE DBH DES MANGROVES DE MAMBOUMBA RIVIERE.....	148
GRAPHIQUE 7 : APPRECIATION DU MODELE DE DISTRIBUTION DE DBH DES MANGROVES DE COCOBEACH	152
GRAPHIQUE 8: APPRECIATION DU MODELE DE DISTRIBUTION DE DBH DES MANGROVES DE MOKA	157
GRAPHIQUE 9: APPRECIATION DU MODELE DE DISTRIBUTION DE DBH DES MANGROVES DE LA REMBOUE.....	161

Liste des cartes

CARTE 1 : LES MANGROVES ESTUARENNES AU GABON.....	4
CARTE 2 : LES RELIEFS DES REGIONS LITTORALES ESTUARIENNES DU GABON	26
CARTE 3 : RELIEF DE L'AGGLOMERATION DE LIBREVILLE	27
CARTE 4 : BASSINS VERSANTS DES COURS D'EAU DES ESTUAIRES DE LA NOYA, DE LA BAIE DE LA MONDAH ET DU KOMO	29
CARTE 5 : BASSINS VERSANTS DU KOMO ET SES PRINCIPAUX AFFLUENTS COTIERS	30
CARTE 6 : BASSINS VERSANTS DE LA BAIE DE MONDAH ET AFFLUENTS	31
CARTE 7 : BASSINS VERSANTS DE L'ESTUAIRE DU RIO MOUNI.....	32
CARTE 8 : LES BASSINS VERSANTS DES COURS D'EAU DES ESTUAIRES A MANGROVES.....	34
CARTE 9 : PLACETTE D'ECHANTILLONNAGE	57
CARTE 10 : HAUTEURS PREDITES PAR TELEDETECTION A PARTIR DU MODELE 1	112
CARTE 11 : HAUTEURS PREDITES PAR TELEDETECTION A PARTIR DU MODELE 2	112
CARTE 12 : HAUTEURS PREDITES PAR TELEDETECTION A PARTIR DU MODELE 3	113
CARTE 13 : HAUTEURS PREDITES PAR TELEDETECTION A PARTIR DU MODELE TIRE DE LA LITTERATURE.....	113
CARTE 14 : HAUTEURS OBTENUES PAR TELEDETECTION A PARTIR DU LIDAR ; TRANSECT DE LA REMBOUE	116
CARTE 15 : HAUTEURS OBTENUES PAR TELEDETECTION A PARTIR DU LIDAR ; TRANSECT DE MATEK.....	118
CARTE 16 : HAUTEURS OBTENUES PAR TELEDETECTION A PARTIR DU LIDAR ; TRANSECT DE MAKOK	119
CARTE 17 : HAUTEURS OBTENUES PAR TELEDETECTION A PARTIR DU LIDAR ; TRANSECT D'AGOUMA.....	121
CARTE 18 : NDVI DES MANGROVES ESTUARIENNES AU GABON.....	123
CARTE 19 : DVI DES MANGROVES ESTUARIENNES AU GABON	124
CARTE 20 : RVI DES MANGROVES ESTUARIENNES AU GABON.....	125
CARTE 21 : RVI AMELIORE DES MANGROVES ESTUARIENNES AU GABON.....	126
CARTE 22 : TVI DES MANGROVES ESTUARIENNES AU GABON.....	127
CARTE 23 : ABG OBTENUES PAR TELEDETECTION A PARTIR DU MODELE 1 HAUTEUR	131
CARTE 24 : ABG OBTENUES PAR TELEDETECTION A PARTIR DU MODELE 2 HAUTEUR	131
CARTE 25 : ABG OBTENUES PAR TELEDETECTION A PARTIR DU MODELE 3 HAUTEUR	132
CARTE 26 : ABG OBTENUES PAR TELEDETECTION A PARTIR DU MODELE 4 HAUTEUR	132
CARTE 27 : CARBONE OBTENU PAR TELEDETECTION A PARTIR DU MODELE 1 HAUTEUR.....	133
CARTE 28 : CARBONE OBTENU PAR TELEDETECTION A PARTIR DU MODELE 2 HAUTEUR	133
CARTE 29 : CARBONE OBTENU PAR TELEDETECTION A PARTIR DU MODELE 3 HAUTEUR.....	134
CARTE 30 : CARBONE OBTENU PAR TELEDETECTION A PARTIR DU MODELE 4 HAUTEUR.....	134
CARTE 31 : CO ² OBTENU PAR TELEDETECTION A PARTIR DU MODELE 1 HAUTEUR.....	135
CARTE 32 : CO ² OBTENU PAR TELEDETECTION A PARTIR DU MODELE 2 HAUTEUR.....	135
CARTE 33 : CO ² OBTENU PAR TELEDETECTION A PARTIR DU MODELE 3 HAUTEUR.....	136
CARTE 34 : CO ² OBTENU PAR TELEDETECTION A PARTIR DU MODELE 4 HAUTEUR.....	136

Liste des planches photos

PLANCHE 1: APERÇU DES PRISE DE L'ACTIVITE HALIEUTIQUE AUX ABORDS DES MANGROVES A COCOBEACH ET A OWENDO	33
PLANCHE 2 : MANGROVE DE LIBREVILLE-OWENDO ENTRE COHABITATION ET PREDATION	34
PLANCHE 3: VARIETE DES MANGROVES RENCONTREE DANS LES ESTUAIRES AU GABON.....	37
PLANCHE 4: PRINCIPAUX MATERIELS UTILISE POUR LE PRELEVEMENT DES DONNEES DANS LES MANGROVES ESTUARIENNES	45

Liste des figures

FIGURE 1 : ESQUISSE GEOLOGIE DU BASSIN SEDIMENTAIRE ESTUARIEN	37
FIGURE 2 : ESQUISSE DE LA STRUCTURATION BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER INTERIEUR	39
FIGURE 3 : APERÇU DES PRISES DE L'ACTIVITE HALIEUTIQUE AUX ABORDS DES MANGROVES A COCOBEACH ET A OWENDO	43
FIGURE 4: DISTRIBUTION MONDIALE DES MANGROVES ET POTENTIEL TAXONOMIQUE.....	46
FIGURE 5: VARIETE DES MANGROVES RENCONTREES DANS LES ESTUAIRES AU GABON	48
FIGURE 6 : BASSIN DE BIOMASSE DANS LES MANGROVES.....	50
FIGURE 7 : COMPARAISON DE CAPACITE DE STOCKAGE DE BIOMASSE.....	51
FIGURE 8 : DISPOSITIF DE TRANSECT ET PLACETTE LE PROTOCOLE DE KAUFFMAN ET AL. (2011)	56
FIGURE 9 : DISTRIBUTION DESCRIPTIVE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES AVANT L'HARMONISATION D'UNITE	59
FIGURE 10: DISTRIBUTION DESCRIPTIVE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES APRES L'HARMONISATION D'UNITE	60
FIGURE 11: LES DIFFERENTES BANDES D'IMAGE SATELLITAIRE UTILISEE.....	65
FIGURE 12 : PROTOCOLE D'EXTRACTION DU SRTM DES MANGROVES	66
FIGURE 13: LES GRANDS AXES DE TRAITEMENT DE DONNEES.....	71
FIGURE 14: PROCEDURE DE L'ETABLISSEMENT DE LA DENSITE DU BOIS.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE 15 : PROCEDURE DE METHODOLOGIE GENERALE	72
FIGURE 16: DISTRIBUTION DES RESIDUS DES MODELES GENERAUX D'ESTIMATION DE HAUTEUR.....	78
FIGURE 17: DISTRIBUTION DES RESIDUS DU MODELE DE PREDICTION DES HAUTEURS DE <i>RHIZOPHORA HARRISONII</i>	79
FIGURE 18: DISTRIBUTION DES RESIDUS DU MODELE DE PREDICTION DES HAUTEURS DE <i>RHIZOPHORA RACEMOSA</i>	80
FIGURE 19 : CROISEMENT DES HAUTEURS OBSERVES ET DES HAUTEURS PREDITES	82
FIGURE 20: DISTRIBUTION GRAPHIQUE DES PARAMETRES DE STATISTIQUE DESCRIPTIVE DES ALIQUOTES	84
FIGURE 21: DISTRIBUTION DES RESIDUS DU MODELE GENERAUX DE PREDICTION DE VOLUME	90
FIGURE 22: DISTRIBUTION DES RESIDUS DES MODELES (1-4) DE PREDICTION DE VOLUME DE <i>RHIZOPHORA HARRISONII</i>	91
FIGURE 23: DISTRIBUTION DES RESIDUS DES MODELES (5-9) DE PREDICTION DE VOLUME DE <i>RHIZOPHORA HARRISONII</i>	92
FIGURE 24: DISTRIBUTION DES RESIDUS DES MODELES (2-5) DE PREDICTION DE VOLUME DE <i>RHIZOPHORA RACEMOSA</i>	93
FIGURE 25: DISTRIBUTION DES RESIDUS DES MODELES (7-9) DE PREDICTION DE VOLUME DE <i>RHIZOPHORA RACEMOSA</i>	94
FIGURE 26: DISTRIBUTION DES RESIDUS DES MODELES (1-4) DE PREDICTION DE VOLUME DE <i>RHIZOPHORA SPP</i>	95
FIGURE 27: DISTRIBUTION DES RESIDUS DES MODELES (5-6/8-9) DE PREDICTION DE VOLUME DE <i>RHIZOPHORA SPP</i>	95
FIGURE 28: DISTRIBUTION DES RESIDUS DES MODELES (1-4) DE PREDICTION DE VOLUME D' <i>AVICENNIA GERMINANS</i>	96
FIGURE 29: DISTRIBUTION DES RESIDUS DES MODELES (5-6/8-9) DE PREDICTION DE VOLUME D' <i>AVICENNIA GERMINANS</i>	96
FIGURE 30: MODELES RETENUS POUR LA PREDICTION DU VOLUME ET LEURS RESIDUS (GENERAL ET <i>RHIZOPHORA HARRISONII</i>).....	97
FIGURE 31: MODELES RETENUS POUR LA PREDICTION DU VOLUME ET LEURS RESIDUS (<i>RHIZOPHORA RACEMOSA ET RHIZOPHORA SPP</i>)	98
FIGURE 32: MODELES RETENUS POUR LA PREDICTION DU VOLUME ET LEURS RESIDUS (<i>AVICENNIA GERMINANS</i>)98	

FIGURE 33: CROISEMENT ENTRE LE VOLUME OBSERVE ET LE VOLUME PREDIT POUR L'ENSEMBLE DES MODELES RETENUS	100
FIGURE 34: COMPARAISON DES PREDICTIONS DE L'ENSEMBLE DES EQUATIONS ENTRE-ELLES	101
FIGURE 35: DIAGNOSTIQUE DU TYPE DE RELATION ENTRE L'AGB ET LE DBH POUR L'ENSEMBLE DES ESPECES.....	102
FIGURE 36: PARAMETRE D'APPRECIATION GRAPHIQUE DU MODELE GENERAL DE PREDICTION DE BIOMASSE (AGB)	104
FIGURE 37: PARAMETRE D'APPRECIATION GRAPHIQUE DU MODELE DE PREDICTION DE BIOMASSE (AGB) DE <i>RHIZOPHORA HARRISONII</i>	104
FIGURE 38: PARAMETRE D'APPRECIATION GRAPHIQUE DU MODELE DE PREDICTION DE BIOMASSE (AGB) DE <i>RHIZOPHORA RACEMOSA</i>	105
FIGURE 39 : PARAMETRE D'APPRECIATION GRAPHIQUE DU MODELE DE PREDICTION DE BIOMASSE (AGB) D' <i>AVICENNIA GERMINANS</i>	106
FIGURE 40 PARAMETRE D'APPRECIATION GRAPHIQUE DU MODELE DE PREDICTION DE BIOMASSE (AGB) DE <i>RHIZOPHORA SPP</i>	106
FIGURE 42: TYPE DE RELATION AGB ET DBH PAR SITE	107
FIGURE 43: CORRELOGRAMME ENTRE LES POTENTIELS PREDICTEURS PAR TELEDETECTION ET L'AGB	128
FIGURE 44: CHOIX DU MODELE DE DISTRIBUTION POUR L'ENSEMBLE DES SITES SELON CULLEN ET FREY.....	143
FIGURE 45: CHOIX DU MODELE DE DISTRIBUTION DES DBH A ALENAKIRI.....	149
FIGURE 46: CHOIX DU MODELE DE DISTRIBUTION DES DBH DE REMBOUE SELON CULLEN ET FREY	153
FIGURE 47: CHOIX DU MODELE DE DISTRIBUTION DES DBH D'ESSASSA SELON CULLEN ET FREY	158
FIGURE 48: CHOIX DU MODELE DE DISTRIBUTION DES DBH D'OVENG SELON CULLEN ET FREY	162
FIGURE 49: CHOIX DU MODELE DE DISTRIBUTION DES DBH DE MAMBOUMBA VILLAGE SELON CULLEN ET FREY..	166
FIGURE 50: CHOIX DU MODELE DE DISTRIBUTION DES DBH DE MAMBOUMBA RIVIERE SELON CULLEN ET FREY ..	170
FIGURE 51: CHOIX DU MODELE DE DISTRIBUTION DES DBH DE MOKA SELON CULLEN ET FREY.....	174
FIGURE 52: CHOIX DU MODELE DE DISTRIBUTION DES DBH DE COCOBEACH SELON CULLEN ET FREY.....	178
FIGURE 53: CARTE FACTORIELLE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DES MANGROVES ESTUARIENNES.....	184
FIGURE 54: REGROUPEMENT DES SITES DES MANGROVES EN FONCTION DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES VUE EN 2 DIMENSIONS.....	186
FIGURE 55: DENDROGRAMME DES SITES DES MANGROVES EN FONCTION DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES VUES EN 3 DIMENSIONS	186
FIGURE 56: CARTE FACTORIELLE DES ESPECES ET DES SITES EN FONCTION DE L'ABONDANCE	190
FIGURE 57: CARTE FACTORIELLE DES SITES EN FONCTION DU GEOFACIES.....	192
FIGURE 58: CARTE FACTORIELLE DES DISTANCES ECOLOGIQUES EN FONCTION DU CENTRE DE GRAVITE DES GEOFACIES	192
FIGURE 59 : CARTE FACTORIELLE DES SITES EN FONCTION DU GEOHORIZON.....	194
FIGURE 60: CARTE FACTORIELLE DES DISTANCES ECOLOGIQUES EN FONCTION DU CENTRE DE GRAVITE DES GEOHORIZONS.....	194
FIGURE 61: LOCALISATION DES ESPECES EN FONCTION DES VARIABLES PHYSICO-CHIMIQUES.....	195
FIGURE 62: CARTE FACTORIELLE DE L'AGB DES MANGROVES ESTUARIENNES.....	199
FIGURE 63: CARTE FACTORIELLE DES STOCKS D'AGB PAR ESPECE, GEOFACIES, GEOHORIZON ET PAR ESTUAIRE...200	
FIGURE 64: INFLUENCE ENTRE CRITERE GEOGRAPHIQUE ET CRITERES BIOGEOGRAPHIQUES DANS LA DISTRIBUTION DE L'AGB PAR SITE	204
FIGURE 65: CARTE FACTORIELLE DES SITES ET DES CRITERES GEOSYSTEMIQUES	205
FIGURE 66: DENDROGRAMME DES SITES A MANGROVES ESTUARIENNE EN FONCTION DU STOCK DE L'AGB.....	206

Liste des histogrammes

HISTOGRAMME 1 : MOYENNES DES PRECIPITATIONS ANNUELLES A LIBREVILLE (ANNEES ?).....	35
HISTOGRAMME 2 : CAPACITE DE STOCKAGE DES GRANDS ECOSYSTEMES FORESTIERS DU MONDE.....	47
HISTOGRAMME 3 : DISTRIBUTION DES HAUTEURS DU GENRE <i>RHIZOPHORA</i>	76
HISTOGRAMME 4 : CLASSIFICATION DU DBH DE MANGROVES D'ESTUAIRES DU GABON SELON LA CLASSIFICATION D'AJONINA ET AL.(2008).....	85
HISTOGRAMME 5 : DISTRIBUTION DES HAUTEURS OBTENUES PAR LIDAR A LA REMBOUE.....	117
HISTOGRAMME 6 : DISTRIBUTION DES HAUTEURS OBTENUES PAR LIDAR A MATEK.....	118
HISTOGRAMME 7 : DISTRIBUTION DES HAUTEURS OBTENUES PAR LIDAR A MAKOK.....	120
HISTOGRAMME 8 : DISTRIBUTION DES HAUTEURS OBTENUES PAR LIDAR A AGOUMA.....	121
HISTOGRAMME 9 : TENDANCE GENERALE DE LA DISTRIBUTION DES DBH PAR SITE.....	141
HISTOGRAMME 10 : AJUSTEMENT DU MODELE DE DISTRIBUTION DE DBH DES MANGROVES POUR L'ENSEMBLE DES SITES	143
HISTOGRAMME 11 : ALLURE GENERALE DES COURBES DE DISTRIBUTION POUR L'ENSEMBLE DES SITES	146
HISTOGRAMME 12 : AJUSTEMENT DU MODELE DE DISTRIBUTION RETENU POUR LE DBH DES MANGROVES D'ALENAKIRI DES SITES	148
HISTOGRAMME 13 : ALLURE GENERALE DES COURBES DE DISTRIBUTION DE DBH POUR ALENKIRI	151
HISTOGRAMME 14 : AJUSTEMENT DU MODELE DE DISTRIBUTION RETENU POUR LE DBH DES MANGROVES DE REMBOUE DES SITES.....	152
HISTOGRAMME 15 : ALLURE GENERALE DES COURBES DE DISTRIBUTION DE DBH POUR REMBOUE.....	155
HISTOGRAMME 16 : AJUSTEMENT DU MODELE DE DISTRIBUTION RETENU POUR LE DBH DES MANGROVES D'ESSASSA DES SITES	157
HISTOGRAMME 17 : ALLURE GENERALE DES COURBES DE DISTRIBUTION DE DBH POUR ALENKIRI	160
HISTOGRAMME 18 : AJUSTEMENT DU MODELE DE DISTRIBUTION RETENU POUR LE DBH DES MANGROVES D'OVENG DES SITES	161
HISTOGRAMME 19 : ALLURE GENERALE DES COURBES DE DISTRIBUTION DE DBH POUR OVENG	164
HISTOGRAMME 20 : AJUSTEMENT DU MODELE DE DISTRIBUTION RETENU POUR LE DBH DES MANGROVES DE MAMBOUMBA V. DES SITES	165
HISTOGRAMME 21 : ALLURE GENERALE DES COURBES DE DISTRIBUTION DE DBH POUR MAMBOUMBA VILLAGE.....	168
HISTOGRAMME 22 : AJUSTEMENT DU MODELE DE DISTRIBUTION RETENU POUR LE DBH DES MANGROVES DE MAMBOUMBA R. DES SITES	169
HISTOGRAMME 23 : ALLURE GENERALE DES COURBES DE DISTRIBUTION DE DBH POUR MAMBOUMBA RIVIERE.....	172
HISTOGRAMME 24 : AJUSTEMENT DU MODELE DE DISTRIBUTION RETENU POUR LE DBH DES MANGROVES DE MOKA DES SITES	173
HISTOGRAMME 25 : ALLURE GENERALE DES COURBES DE DISTRIBUTION DE DBH POUR MOKA	176
HISTOGRAMME 26 : AJUSTEMENT DU MODELE DE DISTRIBUTION RETENU POUR LE DBH DES MANGROVES DE COCOBEACH DES SITES	177
HISTOGRAMME 27 : ALLURE GENERALE DES COURBES DE DISTRIBUTION DE DBH POUR COCOBEACH	180
HISTOGRAMME 28 : TAUX DE CONTRIBUTION DE L'INERTIE TOTALE.....	191
HISTOGRAMME 29 : TAUX DE CONTRIBUTION A L'INERTIE TOTALE DE L'INFORMATION DANS LES DEUX PREMIERES DIMENSIONS.....	198
HISTOGRAMME 30 : TAUX DE CONTRIBUTION A L'INERTIE TOTALE DE L'INFORMATION DANS LES DIMENSIONS 3 ET 4.....	198

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : LES MARAIS MARITIMES A MANGROVES DU GABON.....	28
TABLEAU 2 : ECHELLE STRATIGRAPHIQUE DU BASSIN COTIER GABONAIS.....	37
TABLEAU 3 : STATISTIQUE DESCRIPTIVE DES ESPECES AYANT BENEFICIEES DE LA MISE EN PLACE D'UN MODELE D'ESTIMATION DE HAUTEUR	77
TABLEAU 4 : PARAMETRES D'APPRECIATION DU MODELE DE PREDICTION GENERALE DES HAUTEURS.....	77
TABLEAU 5 : PARAMETRES D'APPRECIATION DU MODELE DE PREDICTION DES HAUTEURS DE <i>RHIZOPHORA HARRISONII</i>	79
TABLEAU 6 : PARAMETRES D'APPRECIATION DU MODELE DE PREDICTION DES HAUTEURS DE <i>RHIZOPHORA RACEMOSA</i>	80
TABLEAU 7: PARAMETRES D'APPRECIATION DU MODELE DE PREDICTION DES HAUTEURS POUR L'ENSEMBLE DES MODELES	81
TABLEAU 8 : RESUME STATISTIQUE DESCRIPTIVE DES DONNEES DE L'INFRADENSITE DES GENRES <i>AVICENNIA</i> , <i>RHIZOPHORA</i> ET MIXTE	83
TABLEAU 9 : PARAMETRES D'APPRECIATION DU MODELE GENERAL DE PREDICTION DE VOLUME.....	86
TABLEAU 10 : PARAMETRES D'APPRECIATION DU MODELE DE PREDICTION DE VOLUME <i>R. HARRISONII</i>	87
TABLEAU 11 : PARAMETRES D'APPRECIATION DU MODELE DE PREDICTION DE VOLUME <i>R. RACEMOSA</i>	87
TABLEAU 12 : PARAMETRES D'APPRECIATION DU MODELE DE PREDICTION DE VOLUME (<i>R. RACEMOSA</i>).....	88
TABLEAU 13 : PARAMETRES D'APPRECIATION DU MODELE GENERAL DE PREDICTION DE VOLUME (<i>A. GERMINANS</i>)	88
TABLEAU 14 : MODELES RETENUS POUR LA PREDICTION DU VOLUME ET LEURS CRITERES D'APPRECIATION.....	99
TABLEAU 15 : MODELES DE PREDICTION DE BIOMASSE ET LEURS CRITERES D'APPRECIATION	103
TABLEAU 16 : MODELES DE PREDICTION DES HAUTEURS PAR TELEDETECTION ET LEURS PARAMETRES D'APPRECIATION.....	111
TABLEAU 17 : MODELE DE PREDICTION DE L'AGB A PARTIR DE LA HAUTEUR ET SES PARAMETRES D'APPRECIATION	129
TABLEAU 18 : PARAMETRES DE STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES PREDICTIONS POUR L'ENSEMBLE DES MODELES	130
TABLEAU 19 : DENSITE DE PEUPEMENT DES MANGROVES ESTUARIENNES DU GABON PAR SITE.....	142
TABLEAU 20: MODELE DE DISTRIBUTION AJUSTE POUR L'ENSEMBLE DES SITES ET LEURS CRITERES D'APPRECIATION	146
TABLEAU 21 : MODELE DE DISTRIBUTION AJUSTE POUR ALENAKIRI ET LEURS CRITERES D'APPRECIATION	151
TABLEAU 22: MODELE DE DISTRIBUTION AJUSTE POUR LES MANGROVES DE LA REMBOUE ET LEURS CRITERES D'APPRECIATION.....	155
TABLEAU 23 : MODELE DE DISTRIBUTION AJUSTE POUR ESSASSA ET LES CRITERES D'APPRECIATION	159
TABLEAU 24 : MODELE DE DISTRIBUTION AJUSTE POUR LES MANGROVES D'OVENG ET LEURS CRITERES D'APPRECIATION.....	163
TABLEAU 25 : MODELE DE DISTRIBUTION AJUSTE DES MANGROVES MAMBOUMBA VILLAGE ET LEURS CRITERES D'APPRECIATION.....	168
TABLEAU 26 : MODELE DE DISTRIBUTION AJUSTE DES MANGROVES DE MAMBOUMBA RIVIERE ET LEURS CRITERES D'APPRECIATION.....	172
TABLEAU 27 : MODELE DE DISTRIBUTION AJUSTE DES MANGROVES DE MOKA ET LEURS CRITERES D'APPRECIATION	175
TABLEAU 28 : MODELE DE DISTRIBUTION AJUSTE DES MANGROVES DE COCOBEACH ET LEURS CRITERES D'APPRECIATION.....	180
TABLEAU 29 : PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DES MANGROVES ESTUARIENNES PAR SITE	183
TABLEAU 30 : ABONDANCE DES MANGROVES ESTUARIENNES POUR L'ENSEMBLE DES SITES.....	188
TABLEAU 31 : STOCK DE BIOMASSE AERIENNE DES MANGROVES ESTUARIENNES PAR SITE	197

TABLEAU 32 : CONTRIBUTION DES DIMENSIONS A L'INERTIE TOTALE EXPLIQUEE.....	198
TABLEAU 33 : APPRECIATION DE LA REPRESENTATIVITE DES ESPECES SUR LA CARTE FACTORIELLE EN FONCTION DE L'AGB.....	200
TABLEAU 34 : APPRECIATION DE LA REPRESENTATIVITE DES SITES SUR LA CARTE FACTORIELLE EN FONCTION DE L'AGB.....	201
TABLEAU 35 : APPRECIATION DE LA REPRESENTATIVITE DES CRITERES GEOSYSTEMIQUES SUR LA CARTE FACTORIELLE EN FONCTION DE L'AGB.....	202
TABLEAU 36 : STOCK DE BIOMASSE AERIENNE DES MANGROVES ESTUARIENNES	207
TABLEAU 37 : STOCK DE CARBONE AERIEN DES MANGROVES ESTUARIENNES	208
TABLEAU 38 : STOCK DE CO ₂ AERIEN DES MANGROVES ESTUARIENNES.....	208
TABLEAU 39 : DESCRIPTIONS QUANTITATIVES DE STOCK AGB DES MANGROVES ESTUARIENNES PAR ESPECES ET SITES CARACTERISTIQUES	209
TABLEAU 40 : DESCRIPTIONS QUANTITATIVES DE STOCK AGC DES MANGROVES ESTUARIENNES PAR ESPECES ET SITES CARACTERISTIQUES	209
TABLEAU 41 : DESCRIPTIONS QUANTITATIVES DE STOCK AGCO ₂ DES MANGROVES ESTUARIENNES PAR ESPECES ET SITES CARACTERISTIQUES.....	210

Liste des organigrammes

ORGANIGRAMME 1: BASSIN DE STOCKAGE DE CARBONE DANS LES MANGROVES	
ORGANIGRAMME 2 : PROCEDURE DE DISCRIMINATION DES MANGROVES AVANT LE TRAITEMENT DES INDICES DE VEGETATION	51
ORGANIGRAMME 3: LES GRANDS AXES DE TRAITEMENT DE DONNEES	
ORGANIGRAMME 4: PROCEDURE DE L'ETABLISSEMENT DE LA DENSITE DU BOIS	
ORGANIGRAMME 5: LES GRANDS AXES DETAILLES DE TRAITEMENT DE DONNEES	58

Liste des annexes

ANNEXE 1 : ABONDANCE DE QUELQUE SITE ET ESPECE.....	213
ANNEXE 2 : RESUME STATISTIQUE DE STOCK DE L'AGB PAR GEOFACIES	213
ANNEXE 3 : RESUME STATISTIQUE DE STOCK DE L'AGC PAR GEOFACIES	214
ANNEXE 4 : RESUME STATISTIQUE DE STOCK DE L'AGCO ² PAR GEOFACIES	214
ANNEXE 1 : INFLUENCE DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE ET DE LA TEMPERATURE EN DES CRITERES BIOGEOGRAPHIQUE	
ANNEXE 2 : INFLUENCE DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE ET DE LA TEMPERATURE EN DES CRITERES BIOGEOGRAPHIQUE ET GEOGRAPHIQUE	

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE.....	i
SIGLES, ABREVIATIONS ET ACRONYMES	ii
DEDICACE.....	iii
REMERCIEMENTS	iv
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1. Contexte et justification du sujet.....	2
1.1. Objet et champ d'étude	2
1.2. Localisation spatio-temporelle	3
1.3. Intérêt du sujet.....	5
2. Approche problématique.....	7
2.1. État de la question	7
2.2. Problématique	11
2.3. Objectifs	14
2.4. Hypothèses	14
3. Approche théorique et méthodologique.....	15
3.1. Cadre conceptuel.....	15
3.2. Cadre théorique	17
3.3. Cadre méthodologique	20
3.4. Difficultés rencontrées	21
3.5. Annonce du plan	21
Partie I: CADRE PHYSIQUE ET METHODES.....	23
CHAPITRE I : Aspects physiques et généralités	25
1. Les aspects physiques de la zone d'étude	25

2.	Conditions météo-marines Côtères	34
3.	Cadre géologique et pédologique.....	36
4.	Végétation et activité humaine : quelle relation ?.....	42
5.	Généralités: mangrove, biomasse et carbone	45
CHAPITRE II: Méthodes de l'étude		55
1.	Collecte des données.....	55
2.	Analyse des données de terrain.....	59
3.	Méthode d'estimation des modèles allométriques au sol.....	61
4.	Méthode d'estimation de modèle par télédétection	64
5.	Modèle de distribution	70
Partie II : MODÉLISATION ET SPATIALISATION DE LA BIOMASSE ET DU CARBONE PAR TÉLÉDÉTECTION.....		74
CHAPITRE III: Équation allométrique du peuplement des mangroves.....		76
1.	Équations de hauteur	76
2.	Densité du bois et classe de diamètre.....	82
3.	Modèle allométrique de volume	86
4.	Équations de biomasse	101
CHAPITRE IV: Équation allométrique par télédétection		110
1.	Hauteur des mangroves estuariennes	110
2.	Indices de végétation et biomasse	121
3.	Diagnostic de relation indice de végétation, SRTM et biomasse.....	127
4.	Biomasse aérienne des mangroves à partir de la hauteur.....	129
5.	Comparaison de la biomasse de mangrove	129
Partie III : FACTEURS DE DISTRIBUTION SPATIALE DE LA BIOMASSE ET DU CARBONE DES MANGOVES.....		138
CHAPITRE V: Modèle de distribution de DBH		140
1.	Diamètres des mangroves estuariens du Gabon: une singularité	140

2.	Distribution par site.....	147
CHAPITRE VI: Les Facteurs de distribution spatiale de biomasse et de carbone des mangroves		182
1.	Environnement des mangroves	182
2.	Mangroves estuariennes du Gabon	187
3.	Organisation biogéographique du peuplement.....	190
4.	Organisation de stock de biomasse aérienne (AGB).....	196
CONCLUSION GÉNÉRALE		211
BIBLIOGRAPHIE		218
ANNEXES		237
3.6.	Annexe 1	238
	Annexe 2.....	239
	Annexe 3.....	239
	Annexe 4.....	240
	Annexe 5.....	241
ILLUSTRATIONS		242
	Liste des graphiques	243
	Liste des cartes	244
	Liste des planches photos	245
	Liste des figures.....	246
3.7.	Liste des organigrammes	251
3.8.	Liste des annexes	252
TABLE DES MATIÈRES.....		253

AKENDENGUE AKEN Igor, 2021, **ESTIMATION ET SPATIALISATION DU STOCK DE BIOMASSE ET CARBONE AERIEN DES MANGROVES ESTUARIENNES AU GABON**. Thèse de Doctorat unique en Géographie et Environnement, spécialité « Biogéographie », Université Omar Bongo ; 255 p.

Résumé - Les mangroves du Gabon, du nord au sud, couvrent trois complexes littoraux : estuarien, deltaïque et lagunaire. Les espèces de mangroves pures rencontrées dans ces milieux sont *Rhizophora racemosa*, *Rhizophora harrisonii*, *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* et *Conocarpus erectus*. L'étude portant sur la biomasse et le carbone aérien de ces mangroves est axée uniquement sur celles des estuaires du Komo, de la Mondah et du Rio Mouni. Les mangroves sont un des écosystèmes qui stocke le plus de biomasse et de carbone au monde. Dans un contexte de changement climatique, les estimations de stock de biomasse et de carbone des mangroves sont au centre des préoccupations scientifiques. Aussi, dans cette quête de quantification de biomasse et de carbone, le Gabon a une place importante. En effet, ses littoraux ont la plus grande richesse spécifique des mangroves de la sous-région Afrique Centrale et les mangroves les plus hautes sur la Terre. Ces particularités de ces mangroves suscite de disposer des outils locaux de prédiction de biomasse et de carbone. Afin de répondre à cette préoccupation, cette étude porte sur l'estimation et la spatialisation de la biomasse aérienne et du carbone des mangroves. Les outils de la géographie sont mis à contribution pour estimer spatialement et expliquer les mécanismes de répartition de la biomasse dans les mangroves et dans les estuaires. La présente recherche a débouché sur la mise en place de 14 modèles, dont 10 modèles de prédiction au sol, notamment : 5 modèles de prédiction de volume, 5 modèles de prédiction de biomasse aérienne et 4 modèles de prédiction par télédétection (soit 3 modèles de prédiction de hauteur des mangroves à partir du SRTM et 1 modèle de prédiction de la biomasse aérienne (AGB) et de carbone à partir de la hauteur). La salinité, le pH, l'altitude, la pression atmosphérique, le pH_{mv}, l'oxygène dissous et la température sont facteur de localisation des *Avicennia germinans*. La localisation spatiale de *Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erectus* et *Phoenix reclinata* est liée à l'altitude et à la salinité. Le stockage de l'AGB et l'AGC est expliqué par la salinité chez *Rhizophora* spp. De même, la localisation spatiale de *Rhizophora harrisonii* est liée au pH, à la température et à la pression atmosphérique. Néanmoins, la biomasse et le stock de carbone chez *Rhizophora harrisonii* sont déterminés par la salinité et l'altitude. Aussi, *Rhizophora racemosa* a-t-il une localisation géographique déterminée par l'oxygène dissous et le pH_{mv} ; tandis que sa capacité, son AGB et son AGC sont liés au pH et, dans une moindre mesure, à l'oxygène dissous.

Mots clés : Estimation, Spatialisation, Biomasse (AGB), Carbone, Gabon, Estuaire, Mangrove

AKENDENGUE AKEN Igor, 2021, **ESTIMATION AND SPATIALIZATION OF BIOMASS AND AERIAL CARBON STOCK OF ESTUARINE MANGROVES IN GABON**. PhD thesis in Environment Geography, speciality "Biogeography", Omar Bongo University; 255 p.

Abstract - The mangroves of Gabon, from north to south, cover three coastal complexes: estuarine, deltaic and lagoon. The pure mangrove species found in these environments are *Rhizophora racemosa*, *Rhizophora harrisonii*, *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* and *Conocarpus erectus*. The study of the biomass and aerial carbon of these mangroves focuses only on those of the Komo, Mondah and Rio Mouni estuaries. Mangroves are one of the ecosystems that store the most biomass and carbon in the world. In a context of climate change, the estimates of biomass and carbon stock of mangroves are at the center of scientific concerns. Also, in this quest for quantification of biomass and carbon, Gabon has an important place. Indeed, its coastlines have the greatest specific richness of mangroves in the Central African sub-region and the highest mangroves on Earth. These particularities of these mangroves give rise to the need for local biomass and carbon prediction tools. To address this concern, this study focuses on the estimation and spatialization of mangrove above-ground biomass and carbon. The tools of geography are used to spatially estimate and explain the mechanisms of biomass distribution in mangroves and estuaries. The present research resulted in the development of 14 models, including 10 ground-based prediction models: 5 volume prediction models, 5 aboveground biomass prediction models, and 4 remote sensing prediction models (i.e. 3 mangrove height prediction models from SRTM and 1 aboveground biomass (AGB) and carbon prediction model from height). Salinity, pH, altitude, atmospheric pressure, pH_{mv}, dissolved oxygen and temperature are factors in the location of *Avicennia germinans*. Spatial localization of *Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erectus* and *Phoenix reclinata* is related to elevation and salinity. The storage of AGB and AGC is explained by salinity in *Rhizophora* spp. Similarly, the spatial localization of *Rhizophora harrisonii* is related to pH, temperature and atmospheric pressure. Nevertheless, biomass and carbon stock in *Rhizophora harrisonii* are determined by salinity and altitude. Also, *Rhizophora racemosa* has a geographic location determined by dissolved oxygen and pH_{mv}; while its capacity, AGB, and AGC are related to pH and, to a lesser extent, dissolved oxygen.

Key words: Estimation, Spatialization, Biomass (AGB), Carbon (AGC), Gabon, Estuary, Mangrove