MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE TOLIARA
INSTITUT HALIEUTIQUE ET DES SCIENCES MARINES

Grade : Master

Mention : Sciences Marines et Halieutiques

Parcours : Ecotourisme et Biomanagement

MEMOIRE DE STAGE

Mars 2023

Etude du stock de carbone dans l'écosystème mangrove : cas du Parc National de Sahamalaza-île Radama (Nord-Ouest de Madagascar)

Par ANDRIAMBOLA Tsiory Mashiyyat, Promotion *Rhyncodon typus* (2019)

Encadreur : Dr. RANIVOARIVELO Lantoasinoro N.

Etude du stock de carbone dans l'écosystème mangrove : cas du Parc National de Sahamalaza-île Radama (Nord-Ouest de Madagascar)

Membres du jury

Président : Dr. MANERA Jean Yves

Rapporteur : Dr. RANIVOARIVELO Lantoasinoro N.

Examinateur : Dr. TODINANAHARY Gildas

Examinateur : Dr. RAKOTOARINIVO William

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier Dieu de m'avoir donné la santé pour mener à bien ce mémoire. Ensuite je tiens à remercier ma mère pour son soutien et ses conseils durant toutes ces années et de m'avoir inculqué la volonté de continuer mes études supérieures. Je suis reconnaissant de ces personnes qui ont intervenu de manières directes ou indirectes à l'aboutissement de ce manuscrit, tout particulièrement :

Au Docteur Irène RASOAMANANTO, Directrice de l'Institut Halieutique et des Sciences Marines (IH.SM) qui m'a permis de suivre ce parcours au sein de l'institut. Amplement merci.

Au Docteur Gildas TODINANAHARY, Responsable de mention de l'IH.SM. Ces quelques lignes vous sont destinées pour marquer ma profonde gratitude.

Aux coordonnateurs du projet PFS, Professeur RAVAOMANARIVO Lala Harivelo, Professeur Igor EECKHAUT et Docteur RASOLOFONIRINA Richard, qui n'ont sans cesse ménagé leurs efforts pour le bon fonctionnement du projet durant ces deux années d'étude.

A mon encadreur pédagogique, Docteur RANIVOARIVELO Lantoasinoro N., Maitre de Conférences et lecteur au niveau de l'IH.SM, Université de Toliara, malgré ses différentes obligations chargées a démontré une disponibilité remarquable. Vos conseils et remarques m'ont été d'une grande aide pour mener à termes ce mémoire.

A NYSOA Aina Le Don, Doctorant à l'Université de Mons, pour ses orientations avisées sur l'application et la possibilité qu'offre la cartographie dans cette étude.

A mes amis des promotions *Rhyncodon typus* et *Delphinus delphis* pour nos complicités et échanges durant ces années universitaires.

A l'association WIOMSA (Western Indian Ocean Marine Science Association) pour avoir financé cette recherche et m'avoir permis de l'exposer lors de son 12ème symposium en 2022.

Aux enseignants, aux personnels administratifs et techniques de toutes les universités que j'ai fréquentées directement ou indirectement au cours de cette formation de Master interuniversitaire ÉCOTOURISME ET BIOMANAGEMENT pour leurs temps qu'ils m'ont consacrés.

Misaotra betsaka !!!

RESUME

Les aires protégées (APs) du Nord de Madagascar qui sont reconnues mondialement fonctionnent par les frais d'entrées payés par les visiteurs, et dont le Parc National de Sahamalaza/île Radama en fait partie. Toutefois, les restrictions sanitaires durant la pandémie de Covid-19 créent un blocage majeur mettant les gestionnaires de ces APs dans une situation critique pour maintenir leur gestion et protection. Avec ses 5.796ha de mangrove et ses services écosystémiques, le Parc National de Sahamalaza/île Radama pourrait présenter une opportunité notamment via le carbone bleu. Ainsi, cette étude a pour objectif de quantifier les stocks de carbone dans la biomasse vivante ainsi que dans le sédiment dudit parc. Entre octobre à décembre 2021, la collecte des données sur terrain pour l'estimation de la biomasse aérienne vivante et de sédiment a été entreprise dans des quadrats de 10*10 m. Tandis que l'analyse des sédiments au laboratoire par la méthode LOI a été effectuée de janvier à mai 2022. Au total 60 quadrats dans 3 sur les 5 parcelles (Ampasimbezo, Maromandia, Ankitsika – Tanandava) ont été réalisés. L'équation de régression linéaire entre la biomasse et le NDVI a permis d'estimer une valeur de 34.463,3TC stocké dans la biomasse aérienne vivante dont Ampasimbezo renferme 97,93%. D'autre part, les sédiments renferment près de 5.949.246,24 TC où plus de 70% se trouve entre 50-200cm du sol. Les résultats montrent que la communauté de mangrove dans le parc est en pleine modification et que des modifications sur la zonation et gestion des parcelles doivent s'opérer rapidement. Le crédit carbone peut être un appuie pour la promotion de l'écotourisme dans la conservation à condition que les modifications apportées soient positives.

MOTS CLES

Mangrove, Sahamalaza, NDVI, carbone, conservation.

ABSTRACT

Northern Madagascar is a world-renowned tourist attraction, and the majority of its protected areas (Pas), including Sahamalaza/island Radama National Park, are maintained in part by the access fees generated by visitors. However, sanitary restrictions during Covid-19 make almost all Pas in strangle for financial support and finding another income activity to maintain their protection becomes critical. With its 5,796ha of mangrove in the Sahamalaza/Radama island National Park, this can be an opportunity for ecosystem service payment especially through blue carbon. This study aims to quantify the carbon stock on living mangrove and in soil on the park. Thus, from October to December 2021, an estimation of the carbon in the above-ground biomass (AGB) by using a cluster of 10*10m. And soil-core of 5cm was carried out from each layer of 0 to 200cm (0-15cm; 15-30cm; 30-50cm; 50-100cm; 100-150cm and 150-200cm) for carbon quantification using Loss On Ignition (LOI) method in center of each cluster. A total of 60 clusters is done in 3/5 of all parcels (Maromandia, Ankitsika – Tanandava, Ampasimbezo). By using the linear equation generated between NDVI and AGB, $y = 0.242x - 0.0224$ with $R^2 = 0.4749$ and carbon factor, a total of 34,463.3TC is stocked on AGB where Ampasimbezo represents 97.93%. Total carbon on soil reaches 5,949,246.24TC where more than 70% is localized in the 3rd last deep layers. Data shows that changes on area zonation and management are needed and an ongoing change is engaged on the mangrove community. Carbon market can help the ecotourism in conservation actions provided that those modifications are constructive.

KEYWORDS

Mangrove, Sahamalaza, AGB-NDVI interaction, carbon pool, conservation.

ACRONYME

AGB : Above Ground Biomass ;

AP : Aire Protégée ;

C : Carbone

CDB : Convention sur la Diversité Biologique ;

CLB : Communauté Locale de Base ;

CLP : Communauté Locale du Parc ;

CNaPS : Caisse National de Prévoyance Sociale ;

Da : Densité apparente ;

DHP : Diamètre à Hauteur de Poitrine (à 1m30) ;

G : Green / Vert ;

GES : Gaz à Effet de Serre ;

IH.SM : Institut Halieutique et des Sciences Marines ;

IRD : Institut de Recherche pour le Développement ;

IUCN /UICN : International Union for Conservation of Nature / Union Internationale sur la Conservation de la Nature ;

LIDAR : Light Detection And Ranging

LOI : Loss on Ignition (perte au feu) ;

MNP : Madagascar National Park ;

MVI : Mangrove Vegetation Index ;

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index / Indice de Végétation ;

NIR : Near InfraRed / Proche Infrarouge ;

ONE : Office National pour l'Environnement ;

PAE : Plan d'Action Environnement ;

PIB : Produit Intérieur Brut ;

R : Red/Rouge ;

REDD+ : Reduction of Emission by Deforestation and Degradation of Forest / Réduction des Émissions dues à la Déforestation et à la Dégradation forestière ;

SAPM : Système des Aires Protégées de Madagascar ;

SCO : Stock de Carbone Organique ;

SCP : Semi-Automatic Classification Plugin ;

SMIR : Spectrométrie en Moyen InfraRouge ;

SWIR : Short Wave InfraRed / Proche Infrarouge ;

UNREDD : United Nations Reduction of Emission by Deforestation and Degradation of Forest;

WTTC : World Travel and Tourism Council ;

ZOC : Zone d'Occupation Contrôlée ;

ZUC : Zone d'Utilisation Contrôlée ;

GLOSSAIRE

Aire protégée : une espace géographique bien délimitée, reconnue, dédiée et gérée, par la loi ou autre moyen efficace, pour atteindre une conservation à long terme de la nature, y compris les services écosystémiques et les valeurs culturelles (Dudley, 2008).

Biomasse aérienne /épigée : la biomasse aérienne comprend les branches, feuilles et tiges au-dessous du substrat. Les plants épiphytes, algues, et arbres et débris morts peuvent être inclus dans cette catégorie (Fourqurean, et *al*., 2014) ;

Biomasse souterraine/ hypogée : la biomasse souterraine est composée essentiellement des racines et pneumatophores. Les pneumatophores aériens sont aussi inclus dans cette classe (Fourqurean, et *al*., 2014) ;

Business de la conservation / Wildlife Economy : Le business de la conservation fait référence aux différents types d'opportunité d'affaire et de source de revenu soutenable possible dans le domaine de la conservation pour l'accomplissement des objectifs de développement durable. En Afrique, 5 grands piliers sont proposés sous le nom de big 5 qui sont : i) l'écotourisme, ii) la chasse, iii) le ranching de la vie sauvage, iv) les produits forestiers non-ligneux et, v) le marché carbone (Snyman, et *al.*, 2020) ;

Equation allométrique : l'équation allométrique établit la relation entre les éléments clés facilement mesurables et accessibles (ex : diamètre, hauteur) et les éléments dont l'estimation est laborieuse (ex : biomasse) (Fourqurean, et *al*., 2014).

Financement exogène : financement international, extérieures au pays tels que trust funds, projets de séquestration de carbone (Meral, et *al.*, 2008);

Financement endogène : financement qui s'auto-entretient à partir du pays tels que financement public, redevances, droits d'entrée (Meral, et *al*., 2008);

Normalized Difference Vegetation Index / indice de végétation (NDVI): le NDVI met en valeur la différence entre la bande visible du rouge et celle du proche infrarouge pour mettre en valeur l'intensité des espaces chlorophylliens. Sa valeur varie entre [-1 ; 1]. Elle permet de séparer la végétation, leur valeur est supérieure à 0, des non-végétaux lors de la classification d'image satellitaire. Les valeurs proches de -1 corresponde à l'eau/mer/océan tandis que les valeurs proches de zéro [-0,1 ; 0,1] sont des sols dénudés ou sédiments **;**

Noyau dur : zone de conservation stricte où toute activité et circulation sont strictement réglementées (Laura & Maya, 2018).

Zone d'occupation contrôlée (ZOC) : zone d'habitation existant avant la création de l'aire protégée (Laura & Maya, 2018).

Zone d'utilisation contrôlée (**ZUC**) : zone dans laquelle les ressources peuvent être prélevées à des fins commerciales, selon une réglementation qui permet leur exploitation durable (Laura & Maya, 2018).

UNITE

°C : degré Celsius ;

% : pourcent ;

cm : centimètre ;

cm^2 : centimètre carré ;

cm^3 : centimètre cube ;

g : gramme

ha : hectare ;

m : mètre ;

t/T : tonne ;

TC/ha : tonne de carbone par hectare ;

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION 1
2. MATERIELS ET METHODES 4
2.1. Zone d'étude 4
2.1.1. Historique et caractéristique 4
2.1.2. Zonation du parc 4
2.1.3. Gestion et surveillance 6
2.1.4. Identification des parcelles 6
2.2. Matériels biologiques 6
2.3. Collecte de données 6
2.3.1. Echantillonnages 7
2.3.2. Acquisition d'image satellitaire 12
2.4. Analyses au laboratoire 13
2.4.1. Détermination de la densité apparente (Da) du sol 13
2.4.2. Détermination du carbone organique dans le sol par LOI 13
2.5. Biomasse et concentration en carbone 14
2.6. Traitement des données 15
2.6.1. Biomasse 15
2.6.2. Image satellitaire 16
2.6.3. Carbone dans le sol 18
2.7. Analyses statistiques 18
3. RESULTATS 19
3.1. Composition floristique 19
3.2. Biomasse aérienne et carbone aérien 19
3.2.1. Biomasse dans les quadrats d'étude 19
3.2.2. Quantité de carbone aérien total dans le site 20
3.3. Concentration en carbone dans le sol 26
3.3.1. Densité apparente 26
3.3.2. Teneur en carbone organique 28
3.3.3. Stock de carbone organique dans le sol selon la profondeur 29
3.4. Relation entre carbone aérienne et carbone dans le sol 30
4. DISCUSSION 32
4.1. Méthodologie adoptée, est-elle la plus fiable ? 32
4.2. Quelles mesures de gestion doivent être prise face au stock de carbone ? 33
4.3. Crédit carbone et écotourisme peuvent-ils être en synergie ? 34
5. CONCLUSION 37

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 39
ANNEXES

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Présentation du parc national de Sahamalaza/île Radama 5
Figure 2 : Localisation des quadrats dans les différentes parcelles 9
Figure 3 : Disposition des quadrats sur les transects (adapté de Kauffman et *al*. 2016) ... 10
Figure 4 : Répartition des données collectées dans les quadrats 11
Figure 5 : Répartition des échantillons à prélever dans la carotte 12
Figure 6 : Méthode d'estimation de la quantité de carbone aérienne 15
Figure 7 : Processus de traitement des images satellitaires (adapté de Gautier et *al*. 1994, Alvin et *al*. 2020) 17
Figure 8 : Répartition des biomasses (en Tonne) par quadrat dans les trois parcelles 20
Figure 9 : Equation de régression linéaire entre NDVI et biomasse aérienne 21
Figure 10 : Distribution de la NDVI selon les parcelles et selon leurs catégories 22
Figure 11 : Distribution de la biomasse aérienne vivante (T) par parcelle pour 100m² 23
Figure 12 : Concentration en biomasse aérienne (T) dans les différentes parcelles 24
Figure 13 : Concentration totale de carbone aérien (T) par parcelle par zonation 25
Figure 14 : Répartition de la concentration en carbone ; 26
Figure 15 : Densité apparente par station 27
Figure 16 : Densité apparente (g/cm^3) dans les parcelles d'étude 27
Figure 17 : Teneur en carbone organique par parcelle (%C.org) 28
Figure 18 : Concentration en carbone organique pour les trois parcelles 29
Figure 19 : Stock en carbone (TC/ha) en fonction du site 29
Figure 20 : Stock en carbone dans le sol (TC/ha) 30
Figure 21 : Relation entre concentration en carbone dans le sol et celle de la biomasse vivante aérienne 31

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des espèces de palétuvier rencontrées à Madagascar (Rasolofo, 2011) ... 7
Tableau 2 : Equations allométriques (Jones, et *al*., 2015; Kauffman, et *al*., 2011) 16
Tableau 3 : Composition floristique de chaque site 19
Tableau 4 : Comparaison entre écotourisme et marché carbone (REDD+) 36

ANNEXES

Annexe 1 : Estimation de la DHP (source : Pearson et *al*. 2005) ..... a
Annexe 2 : Densité apparente du sol ..... a
Annexe 3 : Différentes bandes dans sentinelles 2 (source : Wikipédia, 2022) c
Annexe 4 : Traitement d'image satellitaire pour sentinelle 2 ..... d
Annexe 5 : Extraction des valeurs NDVI ..... g
Annexe 6 : Valeurs issues de l'extraction par Statistical zone et biomasse résultant ..... j
Annexe 7 : Résultats des tests statistiques ..... k
Annexe 7 : Carottes obtenues dans le substrat ..... m

1. INTRODUCTION

Dans un contexte où la préservation de la biodiversité à Madagascar est un enjeu majeur (Philippe & Denis, 2006), les financements posent des contraintes majeures pour la mise en place de programme de conservation (Stephanie & Nigel, 2008). En effet dans sa politique environnementale, face à une faible ressource budgétaire, l'Etat malagasy ne couvre pas plus de 20% du budget dans le déroulement du Plan d'Action Environnement (PAE) depuis 1990, dépend fortement des financements exogènes pour son bon déroulement (Philippe & Denis, 2006). L'engagement pour la vision de Durban en 2003 pour tripler la superficie des APs, de 1,7 à 6 millions d'hectares accompagné des objectifs de Aichii (Maxwell et *al.*, 2020), risque d'exacerber cette situation. Ainsi, l'Etat malagasy a délégué la gestion de ces APs par une gestion communautaire à travers le programme GELOSE loi n°96-025. Cette loi a ensuite été rectifiée par la loi n°2015-005 portant refonte du Code de Gestion des Aires Protégées, par la mise en place du Système des Aires Protégées de Madagascar (SAPM). Ainsi, les entités morales publiques ou privées ont le libre arbitre de choisir respectivement leur modalité de financement sans engagement de l'Etat dans le processus (Meral, et *al.*, 2008).

La problématique du financement des APs est grandissante de plus que leur expansion pour couvrir les 30% de la superficie de la Terre est primordiale pour une efficacité optimale (CDB, 2019) . La mise en place de modalité de financement durable pour la conservation et par la conservation, tout en incluant les populations riveraines dans ces régions dans le plan de financement est fortement sollicitée pour une conservation durable (Worboys, et *al.*, 2015). Parmi ce cas de figure, l'écotourisme et le marché du crédit carbone sont mis en avant dans ce domaine (Meral, et *al.*, 2008) . Aussi l'écotourisme est un facteur pondérant dans le processus de contrepoids contre la dégradation de l'environnement et des trafics environnementaux tout en créant des pratiques économiques profitables pour les communautés et autorités locales (UICN/PAPACO, 2010; WTTC, 2019; Doumenge, et *al.*, 2020). De plus le tourisme est devenu une importante industrie à l'échelle mondiale, participant à hauteur de 10,3% du PIB mondial en 2019 et 7,1% du PIB en Afrique dont l'écotourisme contribue à hauteur de 10% du tourisme (WTTC, 2020).

Le tourisme à Madagascar est en pleine reprise et contribue à hauteur de 5% du PIB du pays avec une valeur cumulé de 383.717 touristes en 2019 (Instat, 2021). Les 60% de ces visiteurs fréquentent les APs dont une partie, catégorisée comme parc national, est gérée par

Madagascar National Parc (MNP), principal promoteur de l'écotourisme (Meral, et *al*., 2008). La redistribution de la moitié des droits d'entrée dans ces dits parcs à la population locale et autochtone sous forme de projet de développement local et l'engagement de ces mêmes populations dans le suivi et contrôle permettent leur inclusion dans le programme de conservation des sites. Cela leur permet en plus d'avoir des sources de revenu alternatives et de réduire les pressions sur l'exploitation des ressources forestières des dits parcs.

Toutefois, l'avenu de la pandémie de coronavirus en début mars 2020 a figé le secteur du tourisme à Madagascar. Aboutissant à la fermeture de 46,35% des entreprises touristiques mettant en péril 641.000 emplois locaux liés au tourisme (Ministere de l'économie et des finances, 2020) et une diminution drastique de 61.2% des travailleurs nouvellement affiliés à la CNaPS dans les services récréatifs, tourisme et Loisir (Instat, 2021). Du côté environnemental, la protection des APs se heurte aux mesures de confinement et aux manques budgétaires par l'absence des visiteurs, aboutissant à la diminution voire à la suspension des patrouilles de suivi. Aussi les crimes environnementaux ont connu des pics de mars à juillet 2020, au tout début de l'application des mesures sanitaires. Ainsi, une augmentation de 76 – 248% des points de feux dans toute l'île par rapport aux prévisions, a été enregistrée, dont les AP ne restent pas indemnes (Johanna, et *al*., 2021). Cette situation met en péril les écosystèmes dans ces régions et les services écosystémiques qui en découlent (De Wasseige, et *al*., 2015; Eba'a, et *al*., 2013). L'avènement du Covid-19 a changé de manière drastique la perception du business de la conservation, amenant aux suggestions de mettre en place une diversification des sources de revenu dans les APs pour une meilleure résilience face aux changements pouvant se produire (Waithaka, 2020; Kamga, et *al*., 2020).

Outre les enjeux de la dégradation de l'environnement et la conservation, l'adaptation et la mitigation des effets du changement climatique sont parmi les préoccupations majeures auxquelles Madagascar doit faire face (Weiskopf, et *al*., 2021). Les écosystèmes terrestres, marins et côtiers, par leurs services écosystémiques, contribuent à ces adaptations notamment les écosystèmes mangroves en agissant comme un puits de carbone. Le stock de carbone dans les mangroves peut atteindre 3 à 4 fois de plus que dans les forêts terrestres par hectare, et sans perturbation ce carbone peut rester séquestré dans le sol pour des centenaires (Worthington & Spalding, 2018) . Ce stock peut être exploité via le programme de Réduction des Emissions dues à la Déforestation et à la Dégradation de la forêt (REDD+) auquel Madagascar adhère. Madagascar dispose de projet pilots REDD+ mais ces projets se

concentrent surtout sur les forêts humides et corridor Est de l'île (Brimont, et *al.* 2015 ; ONE, 2019). Les études de stock de carbone sur les écosystèmes marins et côtiers à Madagascar sont très récentes mais commencent à gagner en popularité ces 10 dernières années. De plus des projets de carbone bleu sont déjà implantés en Afrique, ce qui pourraient servir de projet pilote pour Madagascar (Luis, et *al.* 2023). Aussi les mangroves offrent plusieurs services écosystémiques nécessaires pour la population locale, foyer pour les attraits touristiques (Edward, et *al*., 2011). Malheureusement, les mangroves sont parmi les écosystèmes les plus menacés à Madagascar (Shapiro, et *al*., 2019). Cependant seuls les écosystèmes en bonne santé et peu perturbés fournissent pleinement ces services (De Wasseige, et *al*., 2015).

Nombreux sont les études sur le stock de carbone dans l'écosystème mangrove à Madagascar (Jones et *al.* 2014, Rabarison 2014, Radaniel 2021, Ravelosamiariniriana 2021) dans le contexte d'autofinancement d'un AP mais non de ses interactions avec l'écotourisme/tourisme. En quoi le crédit carbone permet la conservation dans un AP ? Est-ce-que c'est un alternatif à l'écotourisme ? Le crédit carbone et l'écotourisme peuvent-ils être mise en synergie pour la conservation et le développement local ? D'où l'intérêt de cette étude sur « l'évaluation de stock de carbone dans l'écosystème mangrove : cas du parc national de Sahamalaza (Nord-Ouest de Madagascar) » dont l'objectif principal est de déterminer la répartition de stock de carbone pour faciliter la prise de décision pour les éventuels aménagements futurs dans le parc.

Les objectifs spécifiques sont :

- Quantifier la biomasse aérienne vivante ;
- Déterminer la densité apparente du sol selon la profondeur ;
- Déterminer la concentration de carbone dans le sol et dans la biomasse aérienne vivante ;

Dans cette étude, une description de la zone d'étude commencera la partie matériels et méthodes, suivie par la présentation des matériels biologiques et des méthodes de collecte de données pour se terminer par les méthodes de traitement des données. La partie résultats s'enchainera pour être conférée de suite dans la partie discussion. La conclusion accompagnée de quelques recommandations terminera l'étude.

2. MATERIELS ET METHODES

Dans cette partie, la présentation de la zone d'étude sera abordée en premier suivi par les matériels biologiques. Ensuite, les méthodes de collecte des données sur la zone d'étude seront abordées, appuyées d'illustration. Enfin, les méthodes d'exploitation et d'expression des résultats clôtureront cette partie.

2.1. Zone d'étude

La présentation de la zone d'étude comporte l'historique et les caractéristiques du parc national de Sahamalaza/île Radama, la zonation du parc, sa gestion et surveillance ainsi que les parcelles choisies pour les échantillonnages.

2.1.1. Historique et caractéristique

Le Parc National de « Sahamalaza/Iles Radama » est régi par le décret N° 2007-247 portant création dudit parc sis dans les Districts d'Analalava et d'Ambaja. D'une superficie de 26.035 ha, le parc est compris dans les aires centrales de la « Réserve de Biosphère » et dans la « Zone Humide » du même nom, situé dans la côte Nord-Ouest de Madagascar. Ce parc est composé de 10 parcelles dont 2 terrestres, 5 côtières et 3 marines (cf. fig.1) qui sont respectivement : la parcelle terrestre Anabohazo– Ambohitra d'une superficie d'environ 5.218 ha, la parcelle terrestre Ankarafa d'une superficie d'environ 2.208 ha, la parcelle côtière Sijoro – Tranovy d'une superficie d'environ 771 ha, la parcelle côtière Kapany d'une superficie d'environ 583 ha, la parcelle côtière Maromandia d'une superficie d'environ 875 ha, la parcelle côtière Ampasimbezo d'une superficie d'environ 2.198 ha, la parcelle côtière Ankitsika – Tanandava d'une superficie d'environ 1.426 ha, la parcelle marine Lagna d'une superficie d'environ 2.524 ha, la parcelle marine Barrière Corallienne Sud d'une superficie d'environ 8.154 ha, et la parcelle marine Barrière Corallienne Nord d'une superficie d'environ 2.078 ha. La superficie de mangrove dans ce parc est de 5.796 ha.

2.1.2. Zonation du parc

Chaque parcelle du parc est divisée en trois zonations : zone d'utilisation contrôlée (ZUC) où l'exploitation des ressources est autorisée sous surveillance, noyau dur où toute exploitation est interdite et l'accès strictement limité, et enfin la zone tampon, cette zone est de 2 km à vol d'oiseau atour de la limite du parc. Une autre zonation a été créée pour les zones dans le parc mais qui n'appartiennent ni à la ZUC ni au noyau dur, la zone protégée. Sa création avait pour objectif de faciliter le traitement des images satellitaires.

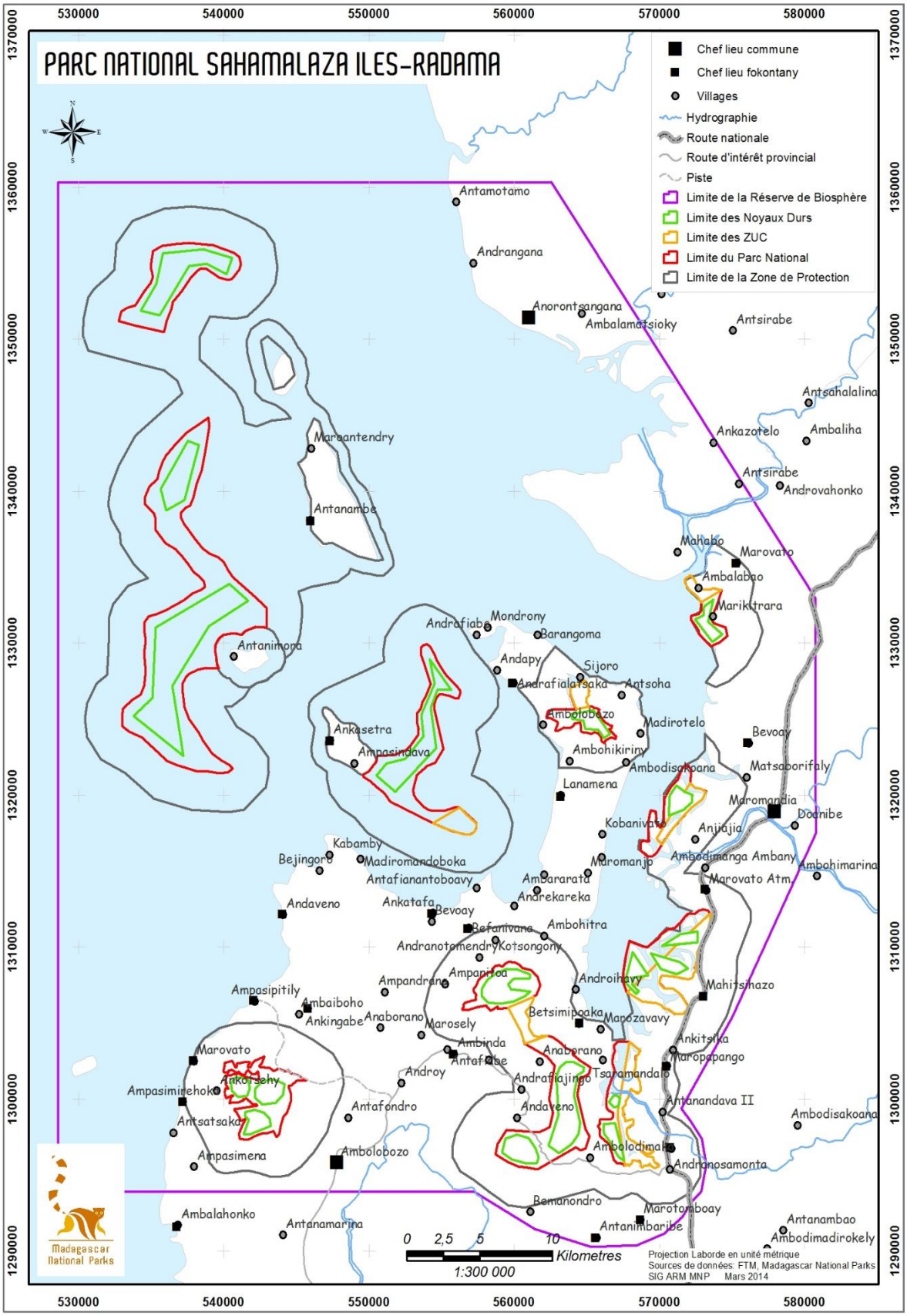


Figure 1 : *Présentation du parc national Sahamalaza/île Radama (source : MNP 2014)*

2.1.3. Gestion et surveillance

La gestion du parc est assurée par l'ONG Madagascar National Parc (MNP), dont un bureau se situe à Sahamalaza dans la commune rurale de Maromandia. MNP travaille en coopération avec les populations locales dans la gestion et surveillance dudit parc par la mise en place de Communauté Locale de Base (CLB) et Communauté Locale du Parc (CLP). Ces communautés assurent les patrouilles et assistent les gestionnaires du parc dans les actions de suivi-évaluation. Ces communautés sont aussi appuyées par MNP dans leur formation pour la création d'Activités Génératrices de Revenu (AGR) et leur professionnalisation pour réduire leur pression sur les ressources forestières et marines (Gilbert, com. pers.).

2.1.4. Identification des parcelles

Une première descente en septembre 2021 a été réalisée pour identifier les parcelles pour cette étude. Ainsi, 3 parcelles ont été choisies selon la représentativité des espèces de mangrove, la diversité du substrat, la proximité des parcelles au site d'hébergement (Commune Rurale de Maromandia), l'accessibilité et la disponibilité en ressources humaines. Ces parcelles sont Maromandia, Ampasimbezo et Ankatsika – Tanandava.

2.2. Matériels biologiques

Les mangroves, forêts composées principalement par les palétuviers, sont présentes dans les zones intertropicales et subtropicales entre 32° N et 38° S. La température de l'eau et ambiante limite sa distribution latitudinale (Giri & Muhlhausen,, 2008). Globalement entre 69 à 70 espèces de palétuviers sont répertoriées dans le monde (Spalding, et *al*., 1997; Spalding, et *al*., 2010) dont 17 sont présentes en Afrique (Norman, 2016). A Madagascar, 8 espèces de palétuviers sont recensées (Jacques, 1995), chacune ayant des noms vernaculaires différents selon la région (cf. tab.1).

2.3. Collecte de données

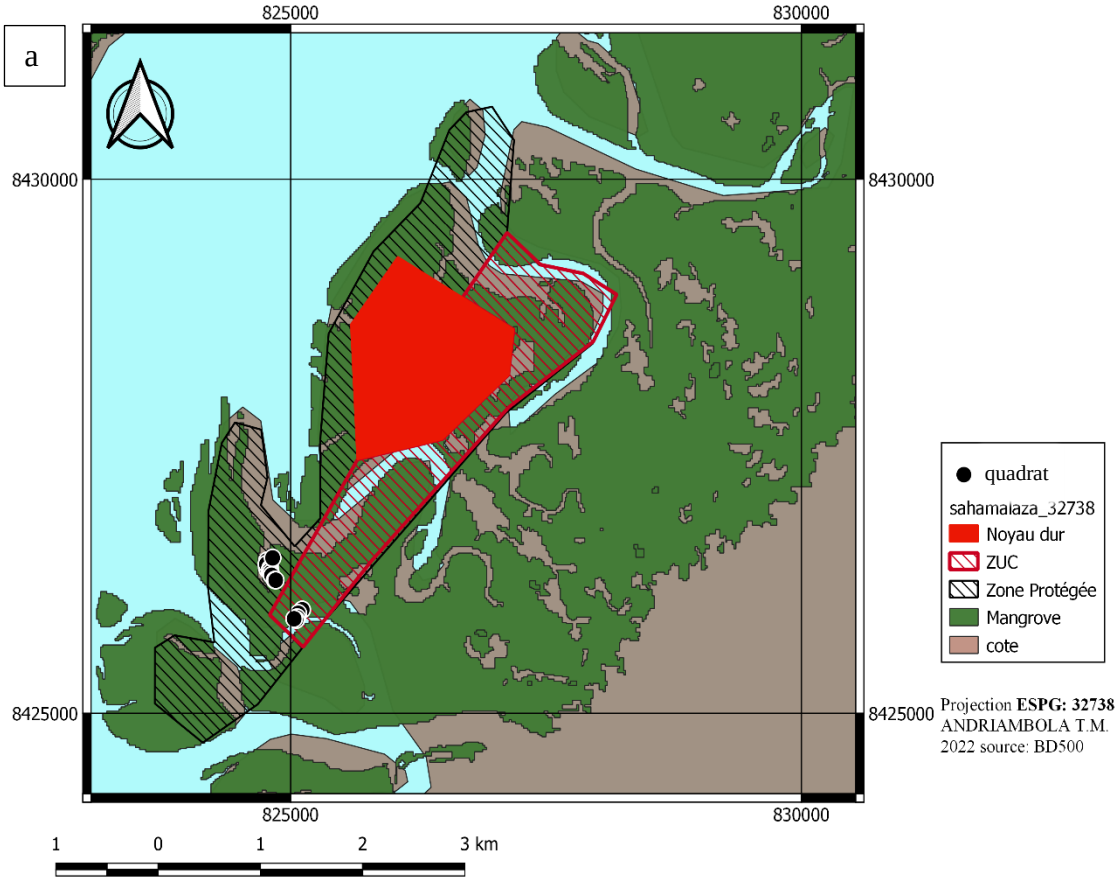
La collecte de données comporte la collecte l'échantillonnage sur le terrain d'une part, et l'acquisition d'image satellitaire pour la télédétection d'autre part. Ces deux parties sont interconnectées par la suite.

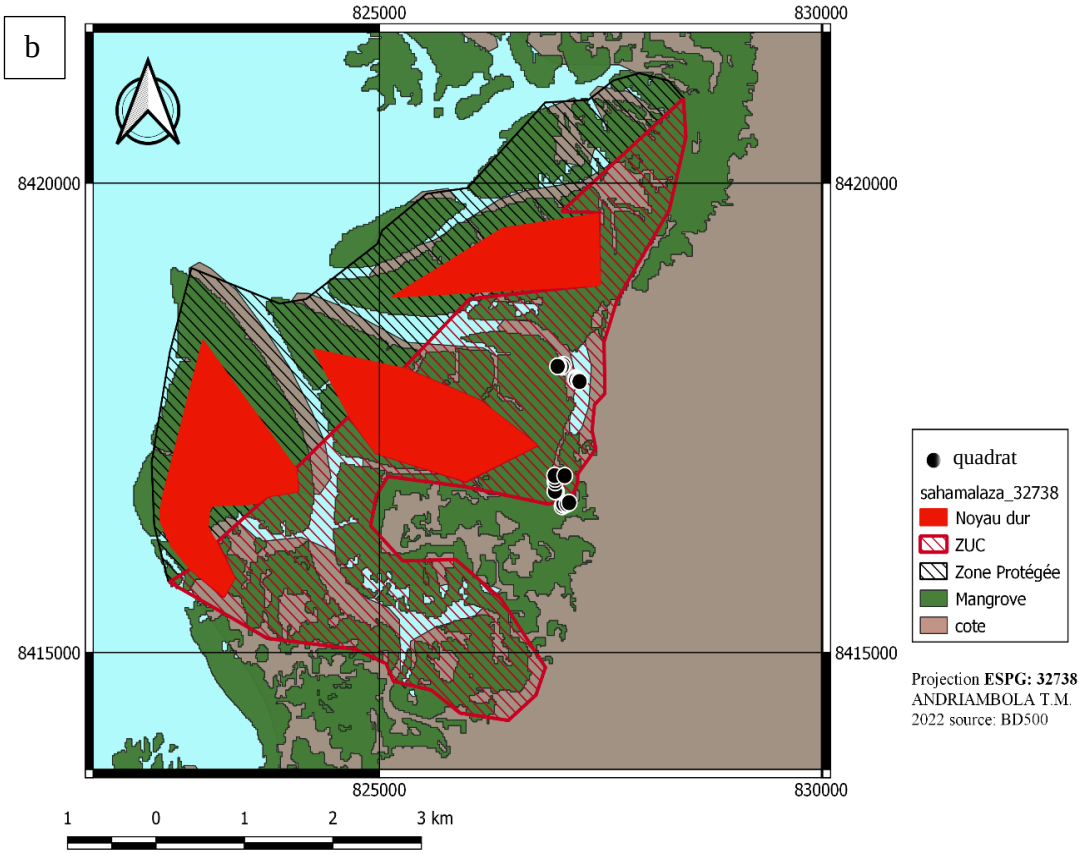
Tableau 1 : Liste des espèces de palétuvier rencontrées à Madagascar (Rasolofo, 2011)

Famille	Nom scientifique	Nom vernaculaire (Nord)	Nom vernaculaire (Sud-Ouest)
Avicenniaceae	*Avicennia marina*	Afiafy	Afiafy
Combretaceae	*Lumnitzeria racemosa*	Lovinjo	Lovintso
Rhizophoraceae	*Ceriops tagal*	Honko vavy	Tangambavy
	Rhizophora mucronata	Honko lahy, aomby vahatse	Tangalahy
	Brugiera gymnorrhiza	Tsitolomy	Tangampoly
Meliaceae	*Xylocarpus granatum*	(L)Atakalaotre, Sarigavo	Fobo
Sterculiaceae	*Heritiera littoralis*	Morimorina	Moromony
Sonneratiaceae	*Sonneratia alba*	Farafaka	Songery

2.3.1. Echantillonnages

Dans les trois parcelles, 60 quadrats de 10*10 m ont été réalisés à raison de 20 par parcelle d'octobre à décembre 2021 dont 30 au niveau des ZUC et 30 au niveau des zones protégées (cf. fig.2). La méthode d'échantillonnage est inspirée par celle de Kauffman et *al.*2016 avec quelque modification sur la forme du quadrat et leurs espacements. Le choix de quadrat de 10 m*10 m a été dans le but de pouvoir comparer les données collectées sur le terrain avec les images satellitaires de sentinelle 2A (dont la taille de pixel est de 10 m*10 m). Ces quadrats sont alignés par 5 perpendiculaires au littoral, espacés de 10 m. Dans chaque quadrat, la hauteur ainsi que le diamètre à hauteur de poitrine (DHP>2,5 cm), des palétuviers ont été notés puis, au centre du quadrat, le carottage du sol a été effectué. Pour les palétuviers de moins de 2,5 cm un comptage a été effectué mais l'estimation de leur biomasse n'est pas possible à partir des équations allométriques disponibles (Jones, et *al*., 2015). La hauteur a été estimée à partir d'une tige de bambou de 20 m de haut avec des marques tous les 1 m. La mensuration du DHP a été réalisé à l'aide d'un décamètre. Pour les *Rhizophora mucronata*, le DHP est mesuré à partir de 130 cm au-dessus de la plus haute racine. Tandis que pour les autres la mensuration a été effectuée à 130 cm au-dessus du sédiment/substrat (Pearson, et *al*., 2005) (Annexe 1). Les coordonnées GPS de chaque quadrat ont été prélevées au même emplacement que les carottes, en leur centre, pour réduire le risque d'erreur pour les analyses d'imagerie satellitaire par la suite (cf. fig.4) (Kauffman, et *al*., 2016).


a
825000
830000
8430000
8425000
quadrat
sahamalaza_32738
Noyau dur
ZUC
Zone Protégée
Mangrove
cote
Projection ESPG: 32738
ANDRIAMBOLA T.M.
2022 source: BD500
1 0 1 2 3 km


b
825000
830000
8420000
8415000
quadrat
sahamalaza_32738
Noyau dur
ZUC
Zone Protégée
Mangrove
cote
Projection ESPG: 32738
ANDRIAMBOLA T.M.
2022 source: BD500
1 0 1 2 3 km

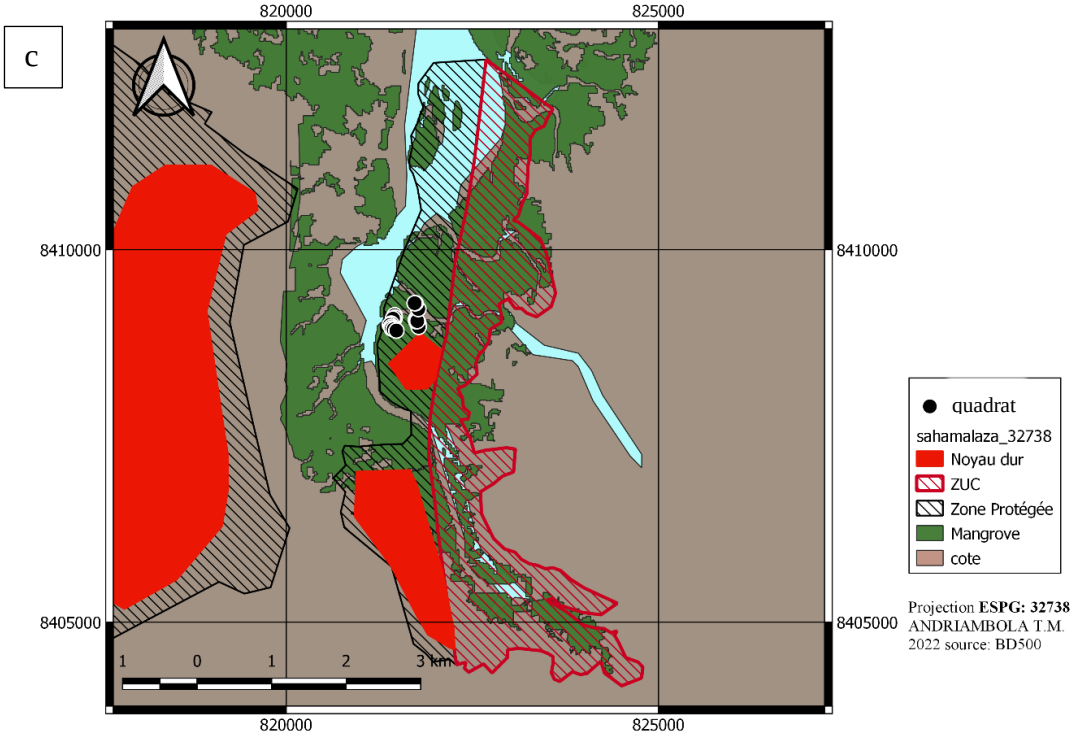


Figure 2 : *Localisation des quadrats dans les différentes parcelles ;*

a) Maromandia ; b) Ampasimbezo ; c) Ankitsika – Tanandava

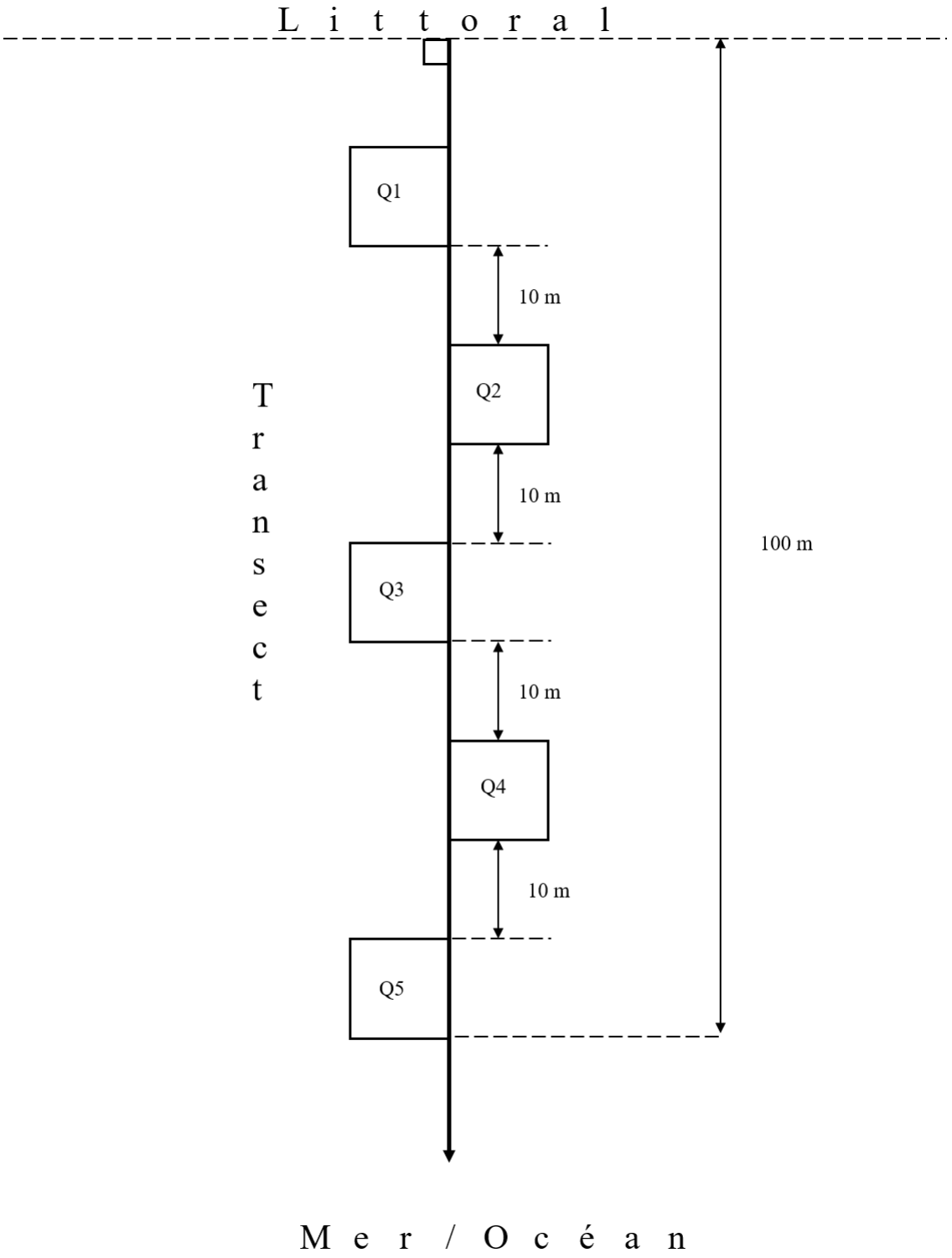


Figure 3 : *Disposition des quadrats sur les transects (adapté de Kauffman et al. 2016)*

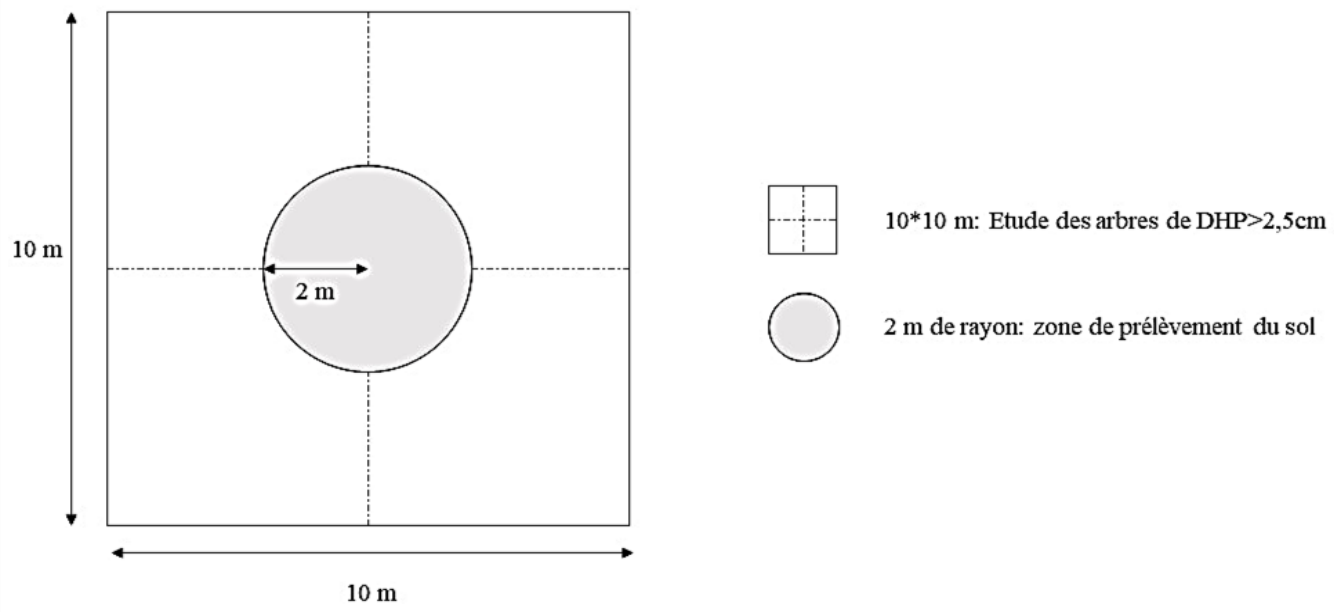


Figure 4 : *Répartition des données collectées dans les quadrats*

Les processus de prélèvement du sol ont été comme suite :

- Enfoncer la carotte en acier inoxydable de 50 cm de diamètre dans le sol jusqu'à 2 m de profondeur ;
- Retirer en tournant la carotte ;
- Couper et nettoyer la face supérieure du sol ;
- Mesurer et marquer les différents intervalles de profondeur : 0 – 15 cm (I), 15 – 30 cm (II), 30 – 50 cm (III), 50 – 100 cm (IV), 100 – 150 cm (V) et 150 – 200 cm (VI) (cf. fig.5) ;
- Prendre une longueur de 5 cm d'échantillon de sol au centre de chaque intervalle de profondeur ;
- Enlever et mettre l'échantillon du sol prélevé dans des sacs en plastique déjà numérotés ;
- Fermer hermétiquement les sacs en plastique et les conserver dans une glacière ;

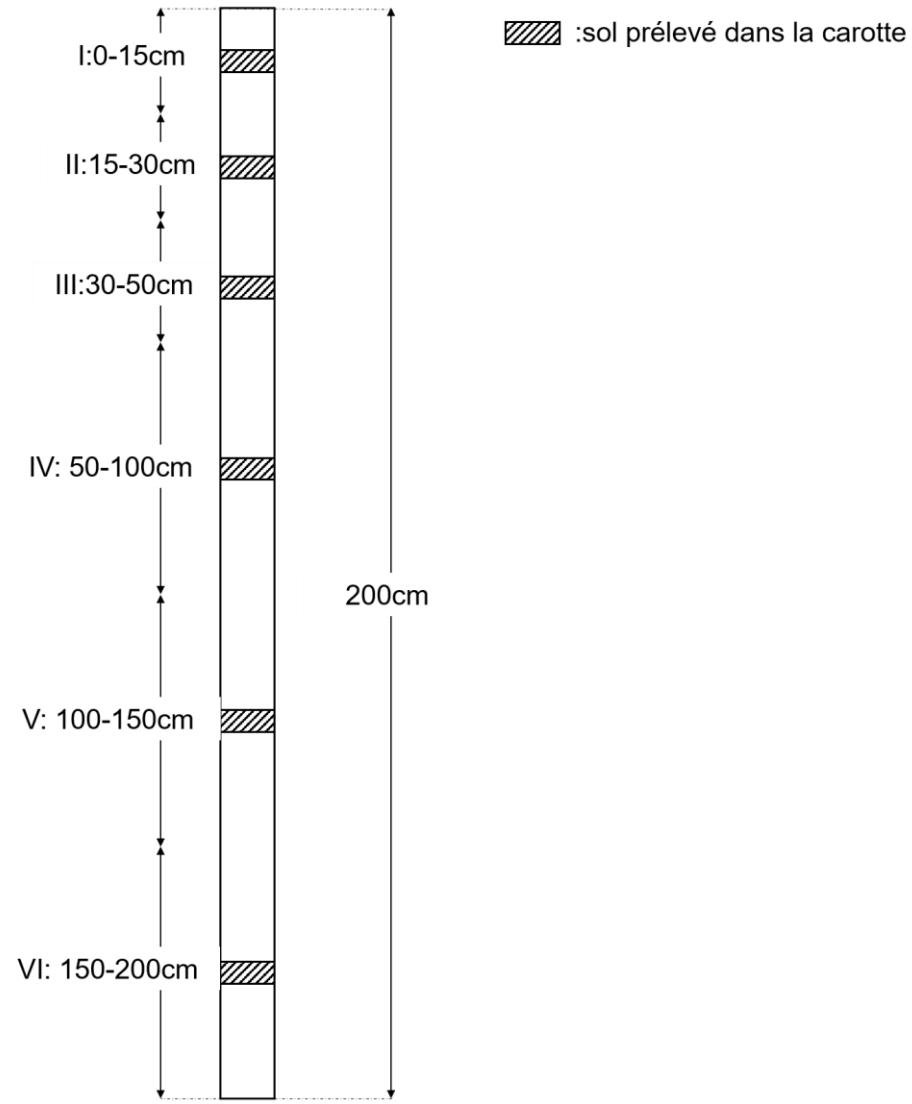


Figure 5 : *Répartition des échantillons à prélever dans la carotte*

Dans une parcelle d'étude, six échantillons de sol correspondant aux 6 intervalles de profondeur sont prélevés. Chaque échantillon de sol collecté a été placé dans un sac en plastique préalablement codifié selon la parcelle, le quadrat et la profondeur, puis fermé hermétiquement. Entre autres, une fois la collecte effectuée, les échantillons ont été entreposés dans un endroit à l'ombre pour être séché et placer dans des sachets plastiques étanches. Par la suite, le sol a été analysé au laboratoire de l'IH.SM par la méthode de **Loss on Ignition (LOI)** pour déterminer la teneur en carbone (Fourqurean, et *al*., 2014).

2.3.2. Acquisition d'image satellitaire

Les images Sentinelle-2A couvrant la zone d'étude sont accessibles via le server Copernicus (https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home), et l'image correspondant le plus au période des

descentes sur terrain a été celui du L1C_T38LRK_A0242113_20211020T071207 du 20 octobre 2021 avec une couverture nuageuse de 5.6857%.

2.4. Analyses au laboratoire

L'analyse au laboratoire ne concerne que les échantillons de sol prélevés. La première étape consiste à déterminer la densité apparente du sol (Da). Pour la deuxième étape, la teneur en carbone organique dans le sol est estimée par la méthode LOI proprement dite.

2.4.1. Détermination de la densité apparente (Da) du sol

La méthode Fourqurean et *al.* en 2014 a permis de déterminer la densité apparente. Cette méthode consiste à diviser le poids sec du sol par le volume de l'échantillon à l'état humide. Pour avoir le poids sec du sol, les échantillons ont été placés dans des boîtes métalliques avant d'être séchés à 60 °C dans une étuve jusqu'à la stabilisation de la masse d'une durée de 168h à 240 h. Ainsi, toutes les 24 heures, 10% des échantillons ont été pesés pour vérifier s'il n'y a plus de variation de poids. La stabilisation était atteinte si la différence de poids, de tous les échantillons pesés, entre deux mesures successives était ≤ 0,1 g.

La densité apparente est exprimée par la formule suivante :

$$Da\left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{masse\ de\ l'échantillon\ séché\ à\ 60°C\ (g)}{volume\ de\ l'échantillon\ à\ l'état\ humide\ (cm^3)}$$

Avec volume de l'échantillon à l'état humide = π * rayon² (cm²) *longueur d'intervalle (de prélèvement) (Annexe 2)

2.4.2. Détermination du carbone organique dans le sol par LOI

La méthode de Brain 1974 a été utilisée pour déterminer la concentration en carbone organique dans le sol. Cette méthode consiste à calciner les matières organiques dans le sol, préalablement séché pour la détermination de la densité apparente, à une température avoisinant les 400 °C jusqu'à stabilisation du poids du sol, mettre cette valeur en pourcentage et ensuite transformer ce pourcentage en teneur en carbone organique à l'aide de coefficient de conversion.

Les sols séchés sortis de l'étuve à 60 °C ont été broyés puis tamisés à 2 mm de maille. Environ 4g des échantillons du sol broyé ont été mis dans un creuset préalablement pesé et stérilisé. Ces échantillons ont été ensuite placés sous 400 °C dans le four à raison de 24 h. Puis ce lapse de temps écoulé, la porte du four a été entrouverte pendant 1-2 h le temps que les échantillons refroidissent, et leurs poids ont été ensuite notés. 3 échantillons ont été

choisis au préalable pour faire le suivi des poids. Cette étape était ensuite répétée jusqu'à la stabilisation du poids de l'échantillon (≤ 0.001 g). Après la manipulation, tous les restes des échantillons de sol broyé ont été mis dans un sachet portant le même numéro que celui des sacs plastiques lors de l'échantillonnage (Ratefinjanahary, 2015) .

Une duplication des sous - échantillons a été nécessaire pour vérifier la précision de la méthode. En effet, un échantillon bien défini/ tiré au hasard a été placé dans le lot à mettre dans le four à moufle. Lors du pesage, l'échantillon a été pesé deux fois et mis dans des creusets différents dont les numéros se suivaient. La duplication a été effectuée sur une échelle de 1/10, c'est-à-dire, sur 10 échantillons 1 est un réplica parmi les 9 (Ratefinjanahary, 2015) .

La teneur en carbone organique $\%C_{org}$ est calculée par la formule :

$$LOI\ (\%) = \frac{masse\ du\ sol\ \text{à}\ 60°C(g) - masse\ du\ sol\ \text{à}\ 400°C(g)}{masse\ du\ sol\ \text{à}\ 60°C(g)} \times 100$$

$$\%C_{org} = \frac{LOI(\%)}{1{,}724}$$

Le coefficient 1,724 est pris car le carbone représente 58 % de la matière organique (Wayne, et *al*., 2019).

2.5. Biomasse et concentration en carbone

L'emploi d'équation allométrique avec les valeurs de DHP et H ont permis de connaître la quantité de biomasse aérienne de l'arbre. Les valeurs de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) pour chaque quadrat ont été corrélés pour permettre d'obtenir l'équation de régression linéaire entre NDVI et biomasse. Une fois l'équation générée, les biomasses dans chaque pixel ont été estimées par extrapolation. Par la suite, la concentration de carbone a été estimée par la conversion de ces données en quantité de carbone via un coefficient de conversion (cf. fig.6).

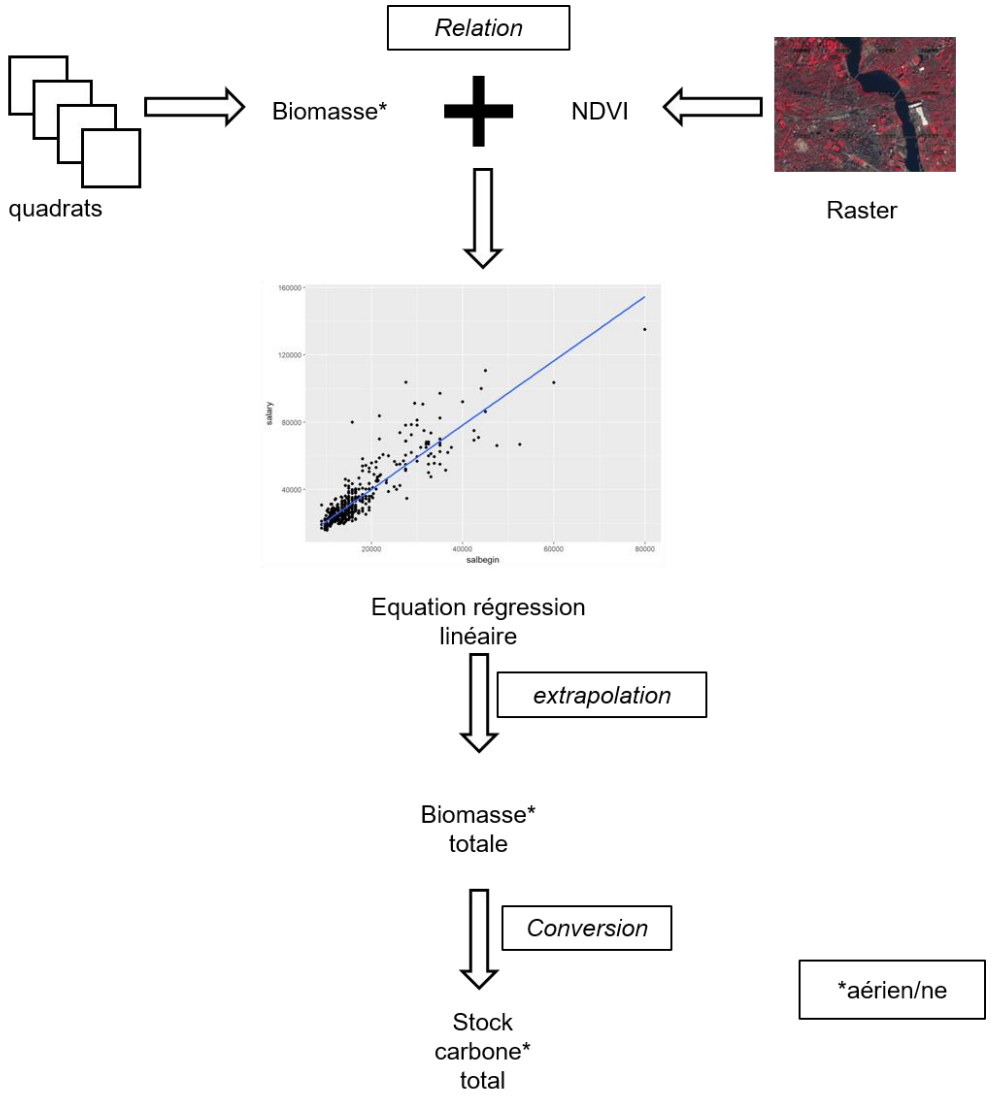


Figure 6 : *Méthode d'estimation de la quantité de carbone aérienne*

2.6. Traitement des données

2.6.1. Biomasse

Le calcul des biomasses épigées se base sur l'utilisation des équations allométriques développées par divers auteurs (cf. tab.2).

Tableau 2 : Equations allométriques (Jones, et *al*., 2015; Kauffman, et *al*., 2011)

Espèces	Equations allométriques		p
Avicennia marina	$B= 0.1848 * DHP^{2.3524}$		0.661
Bruguiera gymnorrizha	Feuille	$B=0.0679 * DHP^{1.4914}$	0.74
	Tige	$B= 0.0464 * (DHP^2 * h)^{0.94275} * p$	
Ceriops tagal	DHP = 2-18 cm	$B=10^{(-0.7247)} * DHP^{2.3379}$	0.803
	DHP > 18 cm	$B=10^{(-0.494)} * DHP^{2.056}$	
Heritiera littoralis	Feuille	$B=0.0679 * DHP^{1.4814}$	1.074
	Tige	$B=0.0464 * (DHP^2 * H)^{0.94275} * p$	
Lumnitzeria racemosa	$B=0.0214 * (DHP^2 * H)^{1.05655} * p$		0.565
Rhizophora mucronata	Feuille	$B=0.0139 * D^{2.1072}$	0.867
	Tige	$B=0.0311 * (DPH^2 * H)^{1.00741} * p$	
Sonneratia alba	$B=0.0825 * (DPH^2 * H)^{0.89966} * p$		0.78
Xylocarpus granatum	$B=0.0830* (DHP^2 * H)^{0.89806} * p$		0.7

Avec p = densité du bois (g/cm^3) ;
D = diamètre ;
DHP = diamètre à hauteur de poitrine (1.3m)
H = hauteur de la canopée

2.6.2. Image satellitaire

La méthode de classification utilisée est celle de Alvin et *al*. 2020 combinée avec celle de Gautier et *al*. 1994. Cela consiste à faire une correction atmosphérique et un réajustement des images en premier lieu. En second lieu, la classification proprement dite qui est facilitée par la combinaison de différentes bandes pour obtenir les rasters Mangrove Vegetation Index (MVI) et Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) pour la quantification de la biomasse (cf. fig.7).

Tout d'abord l'image a été traitée au level 1C avec **QGIS** sous l'extension **Semi-Automatic Classification Plugin (SCP)** pour une correction atmosphérique (bottom of atmosphere BOA) et pour une correction de la réfraction d'image (Annexe 3-4).

Ensuite une classification supervisée a permis de séparer la mangrove des autres végétations non-mangrove, le sol et la mer sur **ecognition** mais aussi sur **QGIS.** Les couches obtenues ont été par la suite recoupées, unies et vérifiées sous SCP en utilisant les bandes 3,8 et 11 sous la formule suivante (Alvin, et *al*., 2020):

$$MVI = \frac{NIR - G}{SWIR1 - G}$$

Avec NIR = Near InfraRed (Proche Infra Rouge, bande 8) ;

G = Green (Vert, bande 3) ;

SWIR1 = Short Wave InfraRed (Infra Rouge à ondes courtes, bande 11) ;

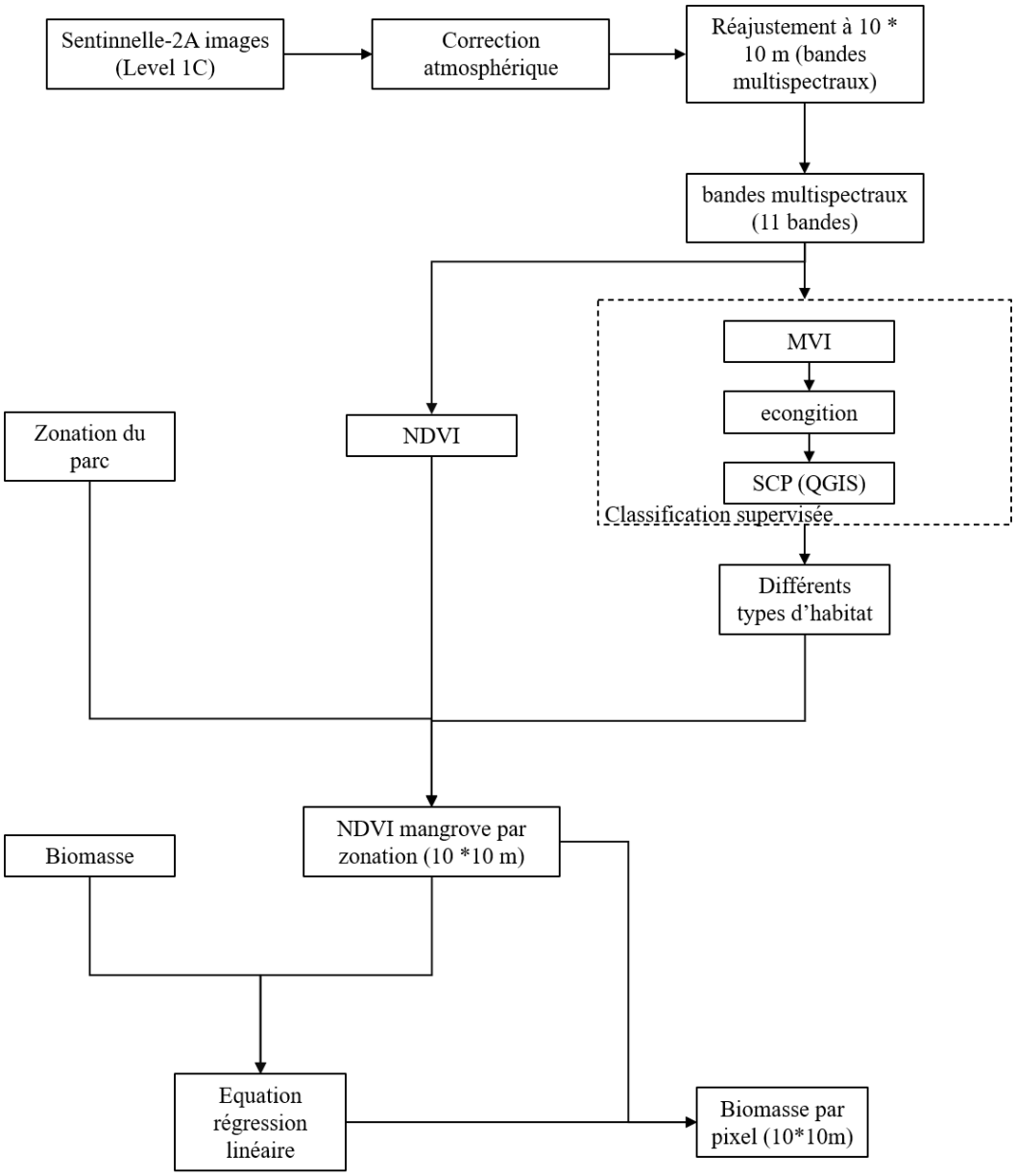


Figure 7 : *Processus de traitement des images satellitaires (adapté de Gautier et al. 1994, Alvin et al. 2020)*

La couche a été passée par une découpé pour ne représenter que ceux qui sont compris dans les délimitations du parc. Après, la détermination de l'indice de végétation NDVI suivait la formule :

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Avec R = Red (Rouge, bande 4);

Les valeurs de NDVI correspondant à chaque quadrat sont ensuite extraites en utilisant l'extension **point sampling tool** sous QGIS (Annexe 5), permettant de générer l'équation de régression linéaire liant la biomasse aérienne en fonction du NDVI. Les valeurs NDVI des mangroves dans le parc après extraction sous **Raster Layer zonal statistic** sont extrapolées suivant ladite équation (Annexe 6).

La quantité de biomasse aérienne totale dans le parc a alors été extrapolée suivant l'équation par l'extension **Raster Layer zonal statistic** et a été représentée en fonction de la zonation. Tandis que la quantité de biomasse et la valeur de NDVI par pixel ont été extraites en utilisant **l'extraction de valeur unique** par pixel sur la couche raster NDVI. Permettant ensuite de représenter la distribution de NDVI et procéder aux analyses statistiques

2.6.3. Carbone dans le sol

Le stock de carbone organique dans le sol a été déterminé à partir de la densité apparente du sol, la teneur en carbone organique et est exprimé par la formule :

$$SCO\ LOI\ (\frac{Mg}{ha}) = \%C_{org}\ \times\ Longueur\ d'intervalle\ \times\ \ Da$$

Source : (Kauffman, 2012)

Avec $\%C_{org}$: teneur en carbone organique ;

Longueur d'intervalle (cm) ;

Da : densité apparente (g/cm^3) ;

2.7. Analyses statistiques

Les tests statistiques dans cette étude ont été réalisés sous R et au seuil de 0,05. Les tests ANOVA et Tuckey ont été utilisés pour confirmer ou infirmer les hypothèses annoncées au début de cette étude (Annexe 7).

3. RESULTATS

La partie résultats est composée de quatre sous-parties : la première concerne la composition floristique des espèces de palétuvier dans les quadrats d'étude ; la deuxième examine la quantité de carbone stockée dans la biomasse aérienne ; la troisième développe la concentration de carbone dans le sol ; et la quatrième partie étudie l'interaction entre la quantité de carbone dans la biomasse aérienne et celle contenue dans le sol.

3.1. Composition floristique

La présence et absence des différentes espèces de palétuvier dans les quadrats d'inventaire est représentée par le tableau suivant (cf. tab.3). La première descente correspondant à la phase exploratoire nous a permis de constater la présence des 8 espèces de palétuviers dans la zone d'étude. Parmi ces 8 espèces seules 6 ont été répertoriées, dans les quadras lors de l'échantillonnage, *Lumnitzera racemosa* et *Heritiera littoralis* étaient absentes. Dans la parcelle Maromandia, l'espèce *Xylocarpus granatum* n'a pas été rencontrée dans les quadras d'étude.

Tableau 3 : Composition floristique de chaque site

Espèce	Ampasimbezo	Ankitsika – Tanandava	Maromandia
Avicennia marina	X	X	X
Lumnitzeria racemosa			
Ceriops tagal	X	X	X
Rhizophora mucronata	X	X	X
Brugiera gymnorrhiza	X	X	X
Xylocarpus granatum	X	X	
Heritiera littoralis			
Sonneratia alba	X	X	X
TOTAL	**6**	**6**	**5**

3.2. Biomasse aérienne et carbone aérien

3.2.1. Biomasse dans les quadrats d'étude

La biomasse par parcelle varie considérablement selon les quadrats (cf. fig.8). La moyenne de la biomasse au niveau des trois parcelles, Ampasimbezo, Ankitsika – Tanandava et Maromandia sont respectivement : 0,106 T +/- 0,037 , 0,109 T +/- 0,026 et 0,113 T +/-0,044 par are (Annexe 4). L'analyse statistique sous ANOVA montre un p(value)=0,181. Ainsi, il n'y a pas de différence significative entre les trois parcelles au seuil de 0,05.

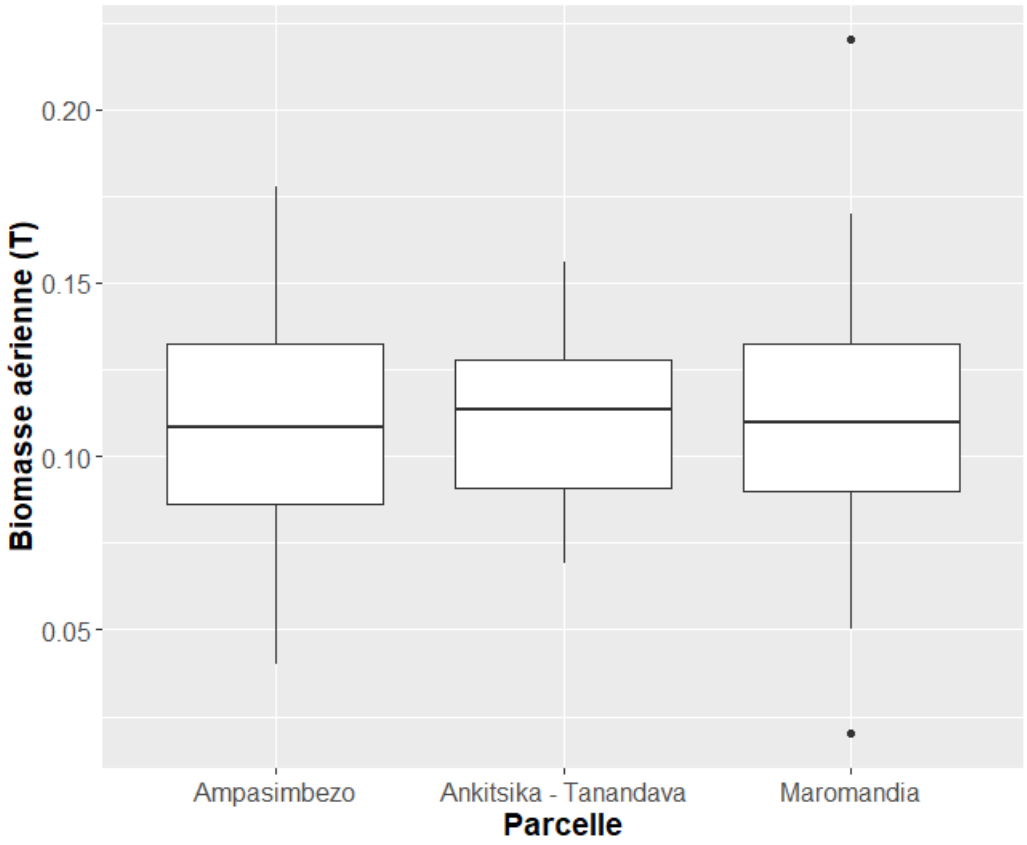


Figure 8 : *Répartition des biomasses (en Tonne) par quadrat dans les trois parcelles*

3.2.2. Quantité de carbone aérien total dans le site

Dans cette division, la mise en évidence de la relation entre la production primaire sous forme NDVI et biomasse aérienne permettra par la suite d'estimer la biomasse aérienne totale dans la zone d'étude après extraction des différentes valeurs de NDVI par pixel et conversion en biomasse. Ces valeurs sont par la suite converties en carbone.

3.2.2.1. Relation entre NDVI et biomasse aérienne dans les quadrats

La relation entre le NDVI et la biomasse permet de créer l'équation de régression linéaire $y = 0{,}242x – 0{,}0224$ où y est la biomasse et x étant le NDVI (cf. fig.9). Les deux variables sont corrélées positivement avec $R^2=0{,}4749$ (p-value : $6{,}917e^{-10}$ sous Fischer). Ainsi, plus la valeur de NDVI est élevée plus la quantité de biomasse est élevée. Cette équation permet de déterminer par la suite la quantité de biomasse par pixel dans la zone d'étude en convertissant les données par pixel.

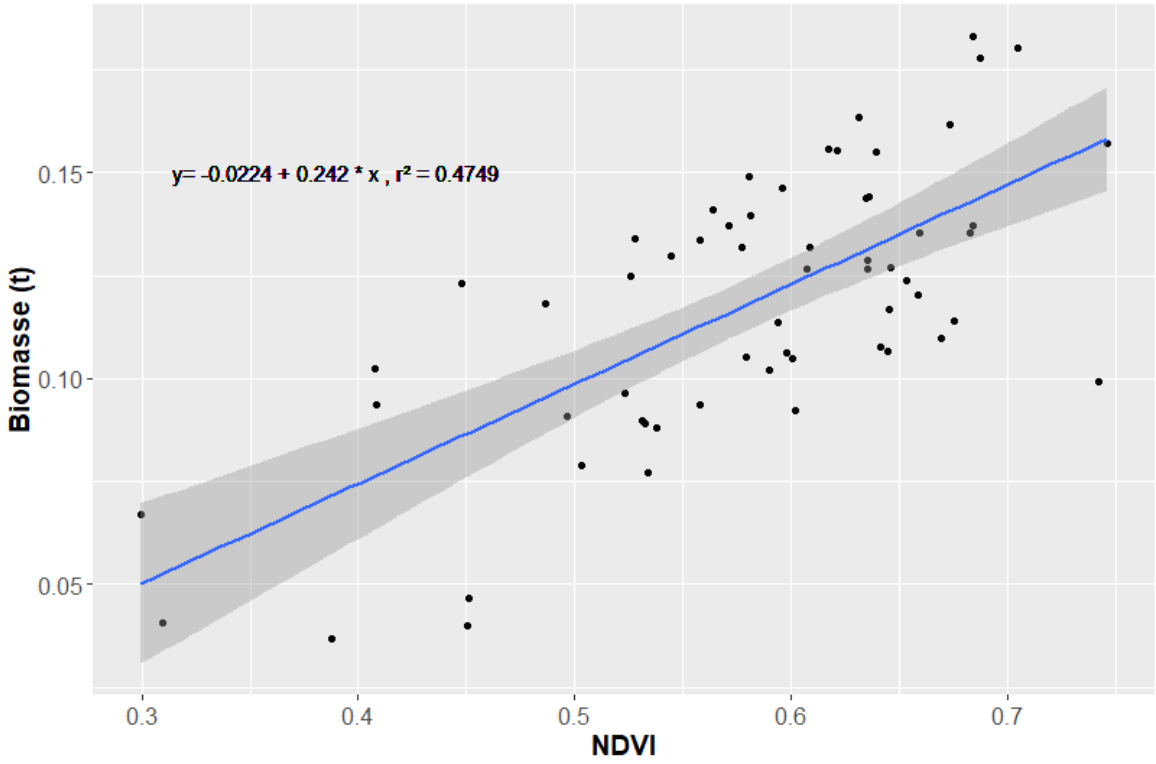


Figure 9 : *Equation de régression linéaire entre NDVI et biomasse aérienne*

3.2.2.2. Estimation de la biomasse aérienne totale et de la concentration en carbone aérien

- **Moyenne du NDVI**

L'extraction des valeurs par pixel de la valeur NDVI a permis de connaitre la distribution de la NDVI par parcelle selon la zonation des parcelles (cf. fig 10). La parcelle de Maromandia présente les valeurs moyennes les plus élevées avec 0,629 au niveau de la zone protégée, 0,574 au niveau de la ZUC et 0,574 au niveau du noyau dur. Tandis que la parcelle d'Ankitsika – Tanandava referme les mangroves à plus faible productivité et dont la variation est très faible entre les zonations : 0,449 dans le noyau dur et zone protégée et 0,445 dans la ZUC. Seules dans les parcelles de Kapany et Sijoro – Tranovy, la valeur moyenne de NDVI dans le noyau dur surpasse celle de la zone protégée.

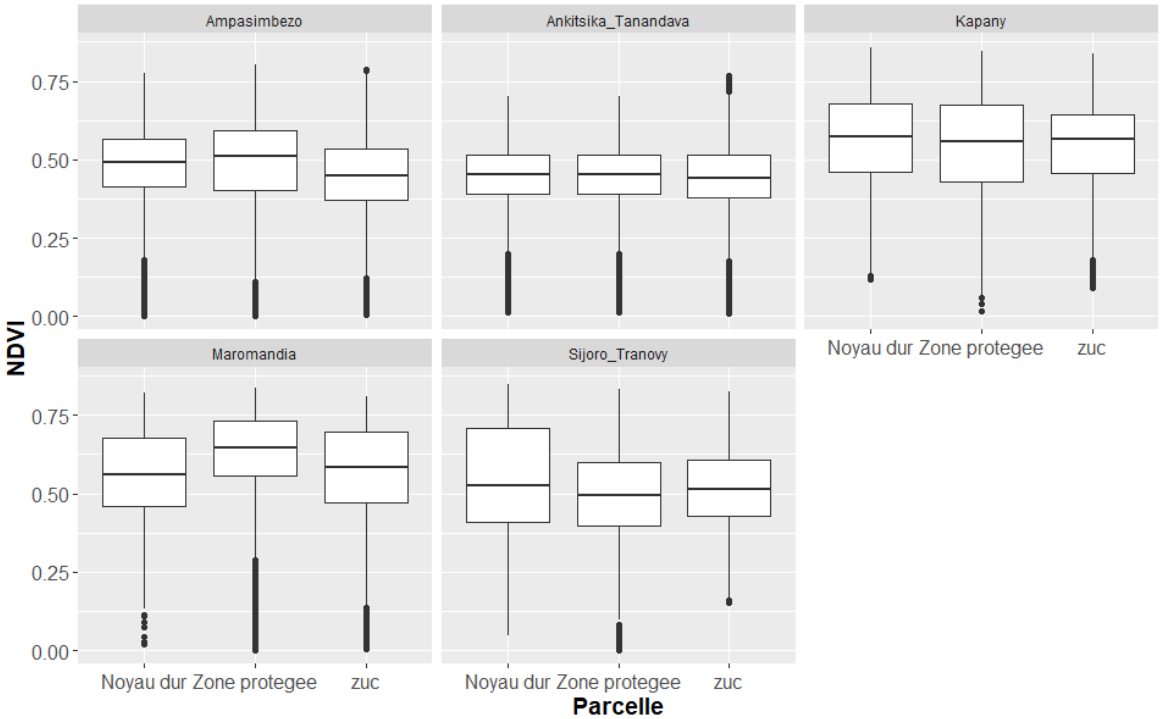


Figure 10 : *Distribution de la NDVI selon les parcelles et selon leurs catégories*

- **Moyenne de la biomasse aérienne par parcelle**

La moyenne de la biomasse aérienne en T par parcelle par pixel varie entre [0,076-0,119] (cf. fig.11). La tendance observée sur la biomasse aérienne présente des similarités à celle observée au niveau du NDVI. Les valeurs les plus élevées se situent au niveau de la parcelle de Maromandia avec 0,1192 T +/- 0,0215 au niveau de la zone protégée, 0,1129 T +/- 0,0237 dans la ZUC et;0,1107 T +/- 0,0205 dans le noyau dur. Les valeurs les plus basses sont au niveau de la parcelle d'Ankatsika – Tanandava avec les valeurs : 0,0830 T +/- 0,009 dans le noyau dur, 0,0787 T +/- 0,0160 dans la zone protégée et 0,0762 T +/- 0,0168 dans la ZUC. Ces valeurs montrent que les taux moyens de biomasse dans les noyaux durs sont les plus élevés par parcelle sauf au niveau de Kapany et Sijoro – Tranovy.

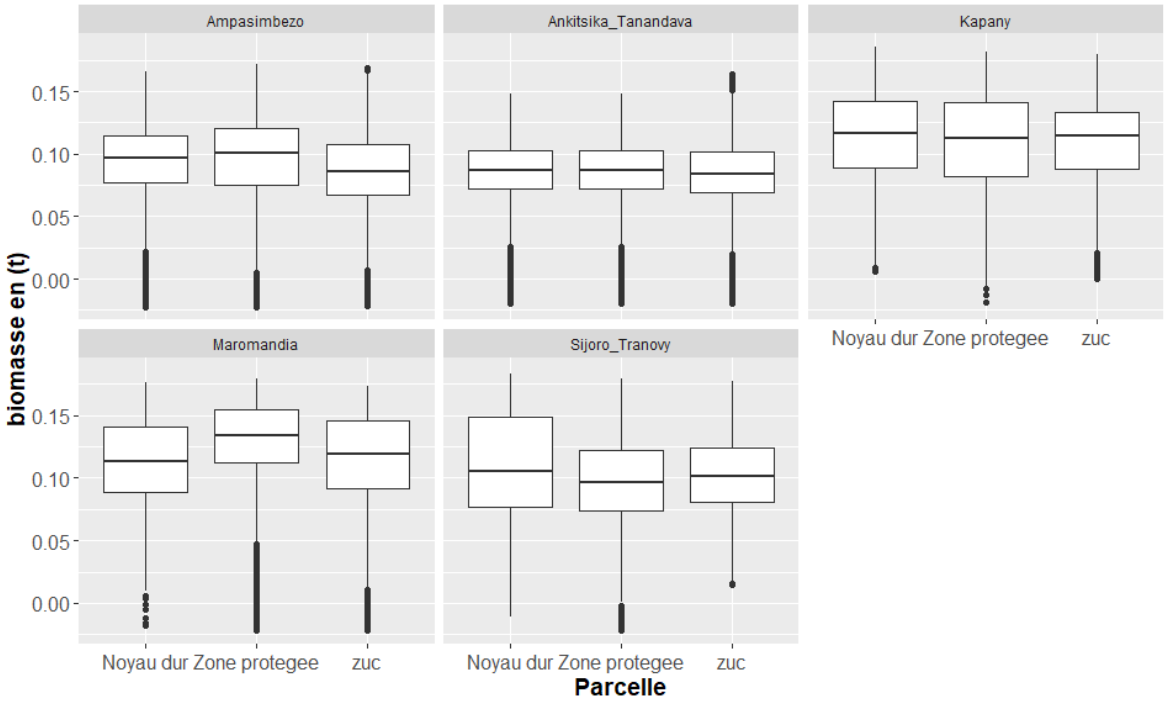


Figure 11 : *Distribution de la biomasse aérienne vivante (T) par parcelle pour 100m²*

- **Estimation de la biomasse aérienne totale**

La concentration totale de biomasse aérienne par parcelle selon la zonation est présentée dans la figure suivante (cf. fig.12). Ainsi le plus fort taux de biomasse se trouve dans la parcelle d'Ampasimbezo avec 17.936,27 T pour 157,152 ha dans la zone protégée suivit par celui de Maromanidia avec 8.554,23 T pour 60,408 ha toujours au niveau de la zone de protection. Ensuite 7.365,96 T pour 70,273 ha se trouve dans la parcelle Ankatsika – Tanandava au niveau de la zone protégée, 7.177,97 T pour 66,464 ha dans la parcelle Ampasimbezo au niveau de la ZUC avec et 6.568,18 T pour 49,883ha dans la parcelle Kapany au niveau de la zone protégée. Puis celle de Sijoro – Tranovy dans la zone protégée avec 6.282,56 T de biomasse aérienne sont renfermées dans 51,882 ha, la parcelle d'Ampasimbezo zonation noyau dur avec 5.154,55 T pour 43,905 ha. Enfin, les parcelles qui ont le plus faible taux de biomasse sont Kapany au niveau de la ZUC avec 1.648,60 T pour 12,748 ha, Sijoro au niveau de la ZUC avec 1.333,07 T pour 10,942ha et Ankatsika – Tanandava zonation noyau dur avec 769,45 T pour 7,271 ha.

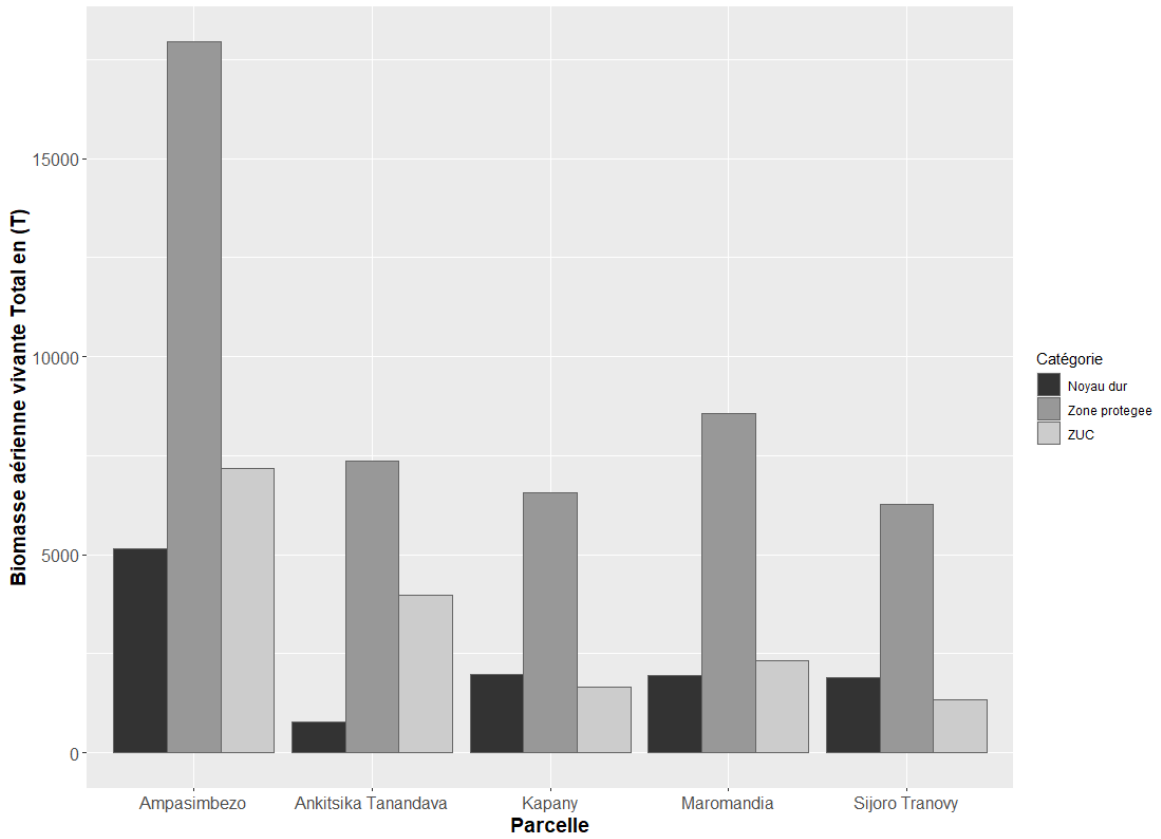


Figure 12 : *Concentration en biomasse aérienne (T) dans les différentes parcelles*

- **Estimation de la concentration en carbone aérienne**

Les tendances observées au niveau de la concentration de la biomasse aérienne en carbone présentent des similitudes à celles observées au niveau de la biomasse aérienne (cf. fig.13). Le plus fort taux de carbone se trouve dans la parcelle d'Ampasimbezo avec 8.250 T dans la zone protégée suivit par celle de Maromanidia avec 3.934,94 T dans la zone protégée. Ensuite la parcelle Ankatsika – Tanandava au niveau de la zone protégée renferme 3.388,34 T de carbone, celle d'Ampasimbezo au niveau de la ZUC 3.301,87 T et celle de Kapany au niveau de la zone protégée 3.021,36 T. Puis celle de Sijoro Tranovy dans la zone protégée renferme 2.889,98 T, celle d'Ampasimbezo au niveau du noyau dur avec 2.371,09 T et celle d'Ankatsika – Tanandava dans la ZUC 1.830,55 T. Enfin, les parcelles qui ont le plus faible taux de carbone aérien sont Kapany au niveau de la ZUC avec 758,36 T, Sijoro au niveau de la ZUC avec 613,21 T et Ankatsika – Tanandava au niveau du noyau dur avec 353,95 T.

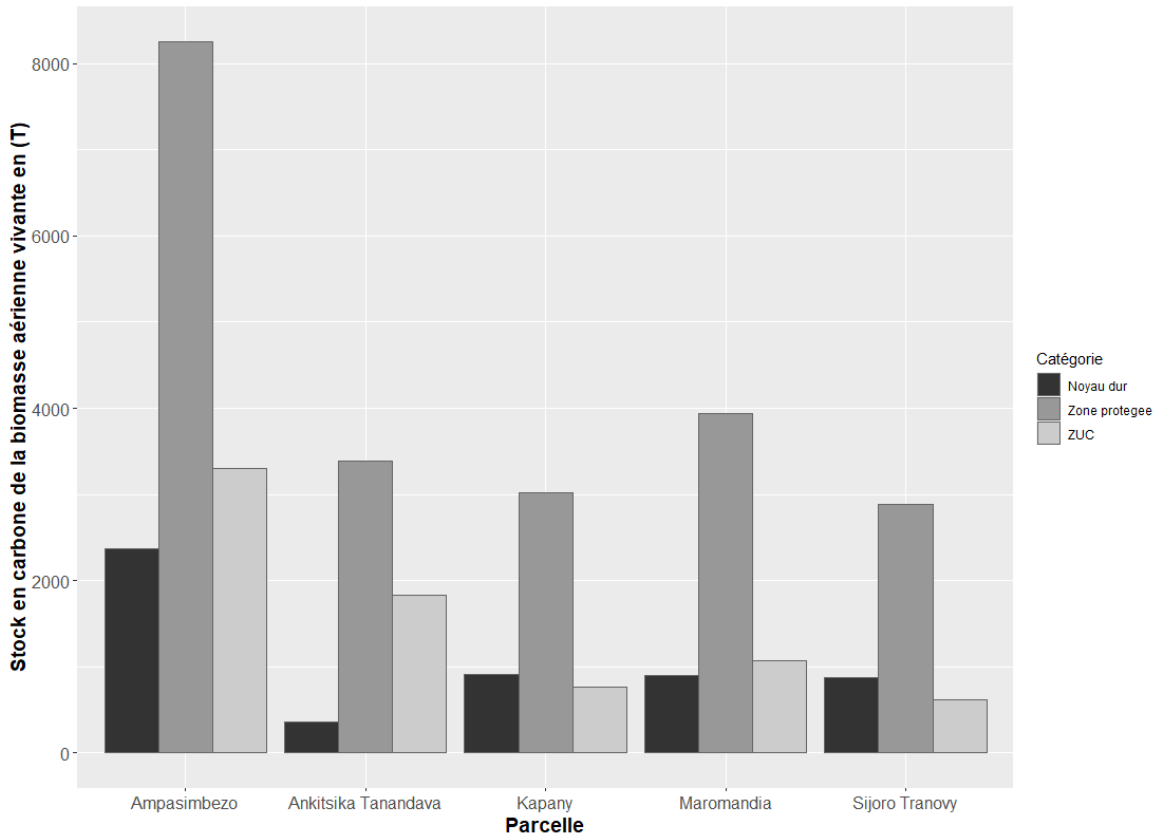


Figure 13 : *Concentration totale de carbone aérien (T) par parcelle par zonation*

- **Répartition de la concentration en carbone dans le parc**

Pour la répartition de la concentration en carbone, la zone protégée représente plus de 38,2% de la concentration totale suivi de la ZUC 34,9% et enfin le noyau dur à 26,9% (cf. fig. 14). Selon les parcelles, la zone protégée renferme le plus de carbone par contre celle du ZUC et noyau dur varie considérablement. La distribution de la concentration selon les parcelles se fait comme suite : la parcelle d'Ampasimbezo abrite plus de 37,93% de la concentration totale, puis celle de Maromandia avec 19,96% et celle de Kapany avec 16,07%. La parcelle de Sijoro – Tranovy renferme 15,47% de la concentration tandis que celle d'Ankatsika – Tanandava 10,57%.

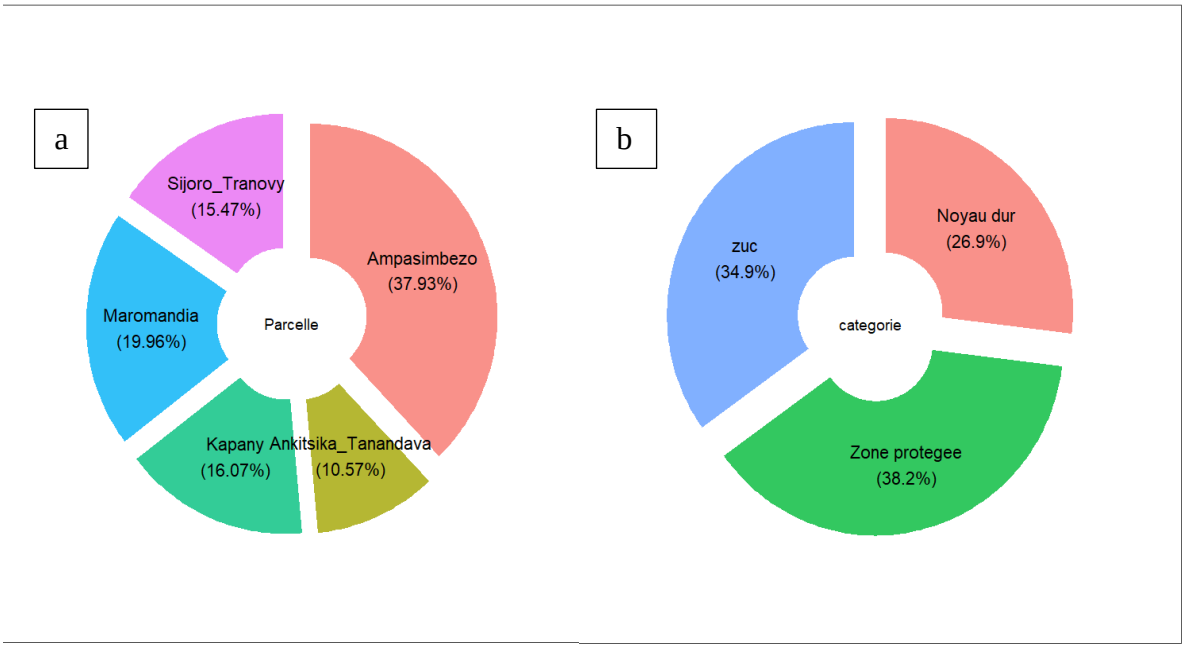


Figure 14 : *Répartition de la concentration en carbone ;*

par a) parcelle, b) catégorie/zonation ;

3.3. Concentration en carbone dans le sol

La densité apparente, la teneur en carbone organique et le stock en carbone organique sont présentés dans cette sous-partie en fonction du site d'une part et en fonction de la profondeur d'autre part.

3.3.1. Densité apparente

3.3.1.1. Densité apparente en fonction de la parcelle

La densité apparente des sols selon la profondeur est représentée dans la figure suivante (cf. fig. 15). La densité apparente par site varie entre [1,10-1,19] (cf. fig.15). La densité apparente à Maromandia est de 1,10 +/- 0,17 g/cm^3, celle d'Ampasimbezo est de 1,14 +/- 0,08 g/cm^3 et celle d'Ankitsika – Tanandava est de 1,19 +/- 0,13 g/cm^3.

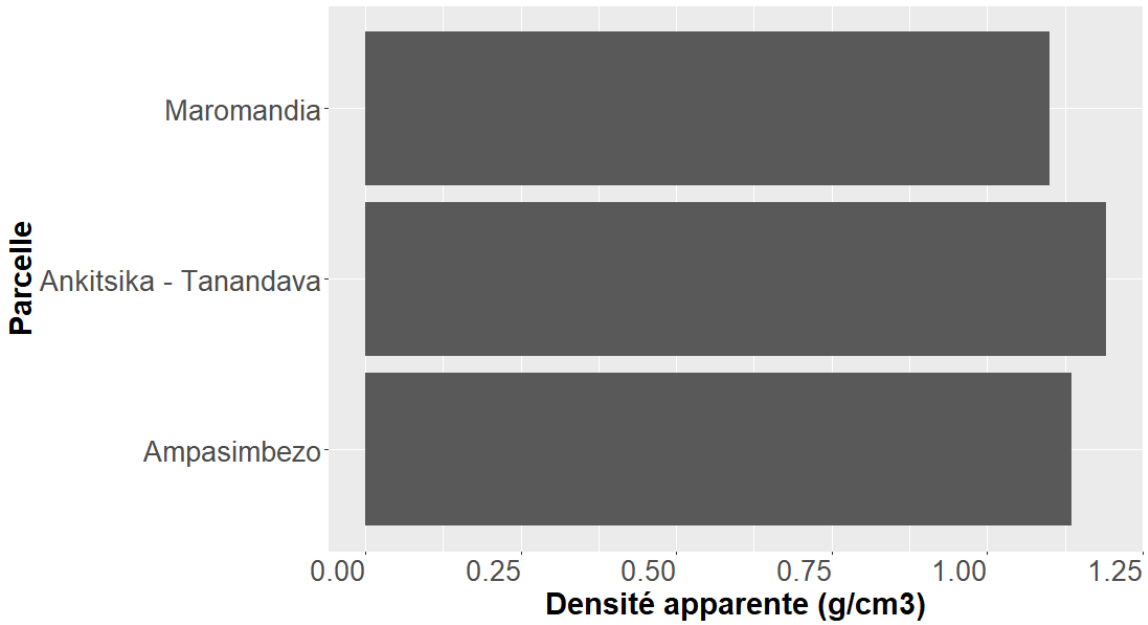


Figure 15 : *Densité apparente par station*

3.3.1.2. Densité apparente en fonction de la profondeur

Les densités apparentes les plus élevés se situent entre [0-15 cm] avec 1,189 +/- 0,228 g/cm^3. De là, elle décroit pour atteindre sa valeur la plus basse entre [15-30 cm] avec 1,08 +/- 0,208 g/cm^3, pour ensuite croitre progressivement jusqu'à atteindre la profondeur de 150cm avec 1,155 +/- 0,243 g/cm^3 (cf. fig.16). De [30 – 50cm] la densité apparente est de 1,133 +/- 0,175 g/cm^3, et elle monte à 1,154 +/- 0,19 g/cm^3 entre [50 – 100 cm]. Entre [150 – 200 cm] la densité apparente est de 1,145 +/- 0,171 g/cm^3.

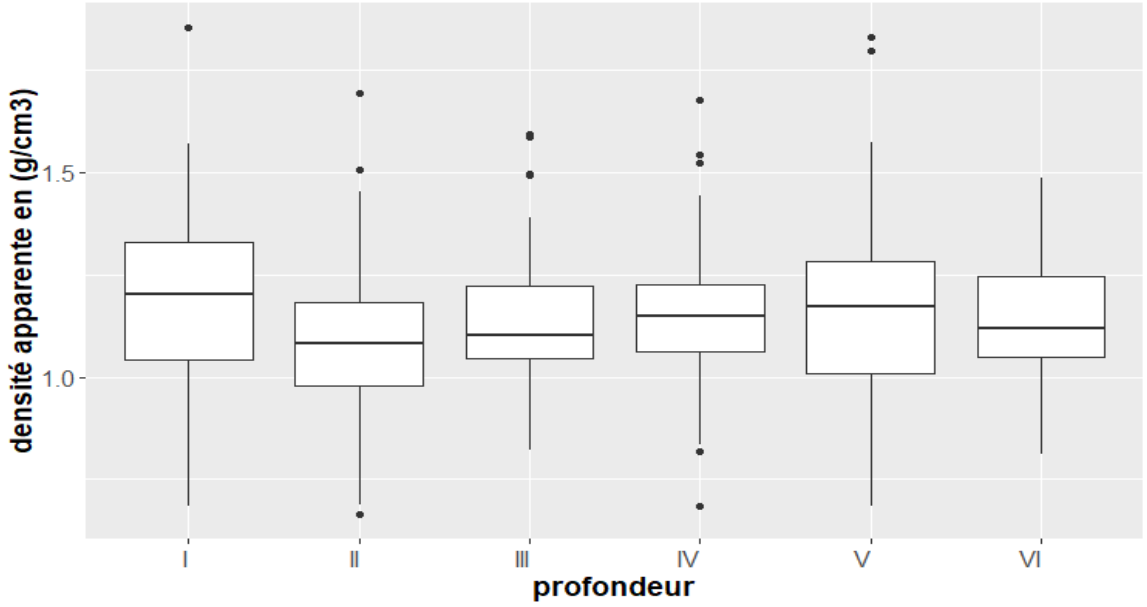


Figure 16 : *Densité apparente (g/cm^3) dans les parcelles d'étude*

3.3.2. Teneur en carbone organique

3.3.2.1. Teneur en carbone organique en fonction de la parcelle

La teneur en carbone organique varie entre [4,94-5,92 %] selon de la parcelle (cf. fig.17). La teneur la plus faible est à Maromandia avec 4,94 +/- 1,58 %, suivit de celle d'Ankitsika – Tanandava avec 5,21 +/- 1,36 % et enfin celle d'Ampasimbezo avec 5,92 +/- 1,43 %.

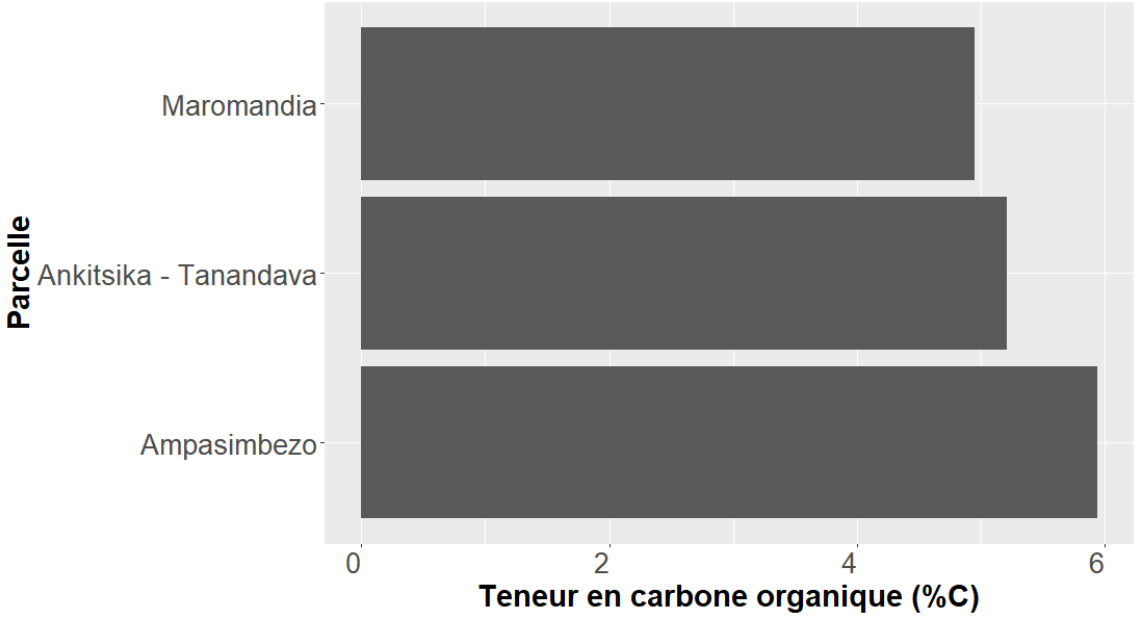


Figure 17 *: Teneur en carbone organique par parcelle (%C.org)*

3.3.2.2. Teneur en carbone organique en fonction de la profondeur

La teneur en carbone organique varie considérablement en fonction de profondeur (cf. fig.18). Elle est de 5,33 +/- 2,71 % entre [0-15cm] et monte à 6,02 +/- 3,31% entre [15-30cm]. Entre [30-50cm] la teneur passe à 5,81 +/- 2,61 % et à 5,12 +/- 2,58 % entre [50-100cm]. Elle passe à 4,72 +/- 2,12 % entre [100-150cm] pour enfin atteindre la valeur de 5,21 +/- 2,73 % entre [150-200cm].

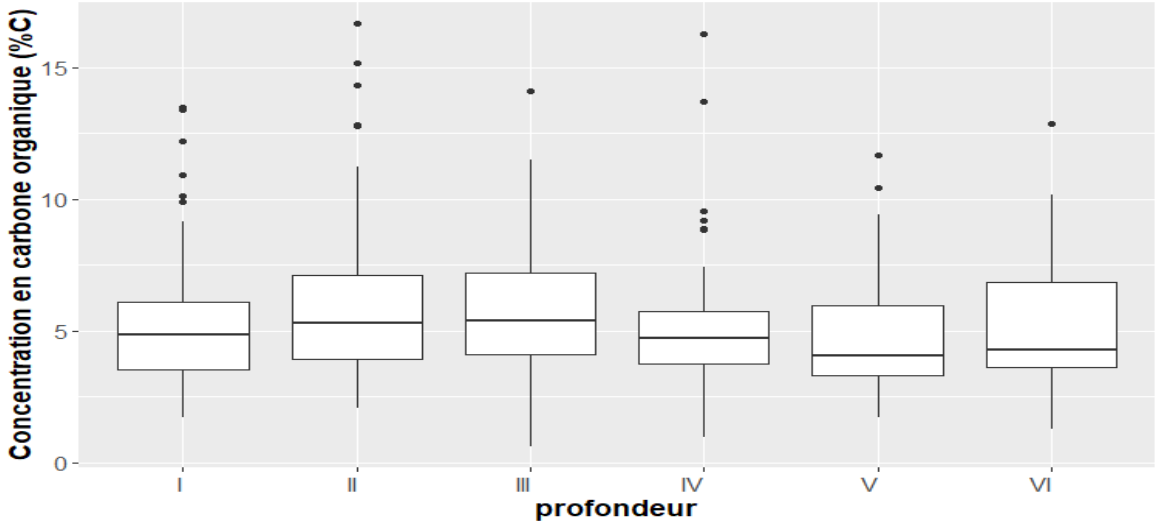


Figure 18 : *Concentration en carbone organique pour les trois parcelles*

3.3.3. Stock de carbone organique dans le sol selon la profondeur

3.3.3.1. En fonction de la parcelle

Le stock en carbone organique dans le sol varie selon la parcelle (cf. fig.19). Maromandia renferme 940,20 +/- 550,89 TC/ha, la parcelle d'Ankitsika – Tanandava quant à elle renferme 955,81 +/- 292,41 TC/ha. Tandis que la parcelle de Maromandia, ayant la plus forte valeur renferme 1183,32 +/- 329,78 TC/ha.

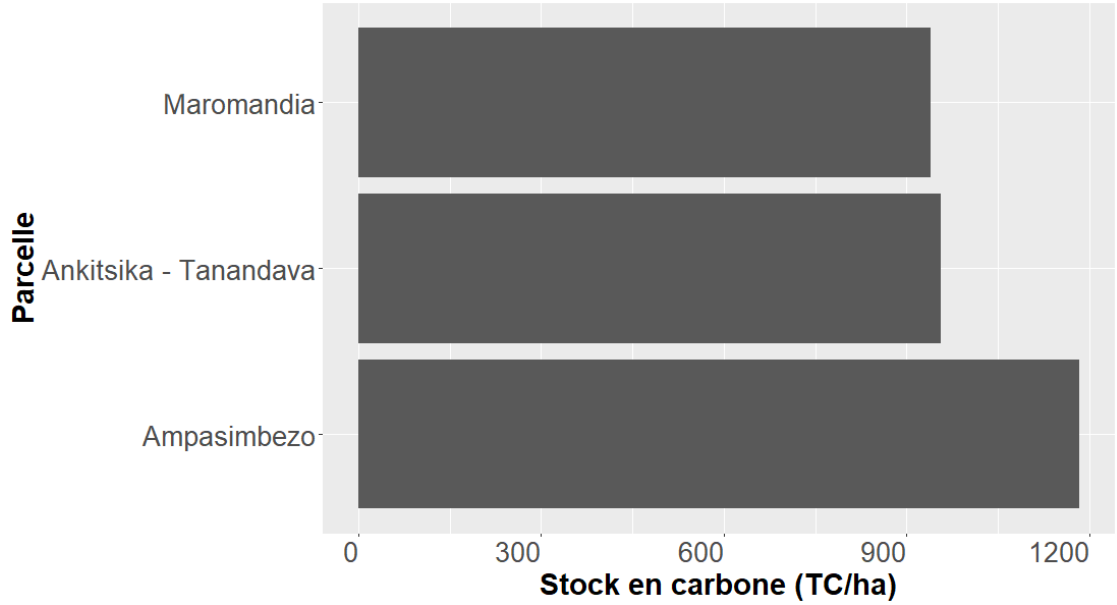


Figure 19 : *Stock en carbone (TC/ha) en fonction du site*

3.3.3.2. En fonction de la profondeur

La concentration en carbone croit selon la profondeur de [0-100 cm] pour enfin se stabiliser entre [50-200 cm] (cf. fig. 20). Elle passe de 98,698 TC/ha entre [0-15 cm] pour atteindre la valeur de 294,893 TC/ha entre [50-100 cm], de là la valeur fluctue entre [278,833-297,658 TC/ha].

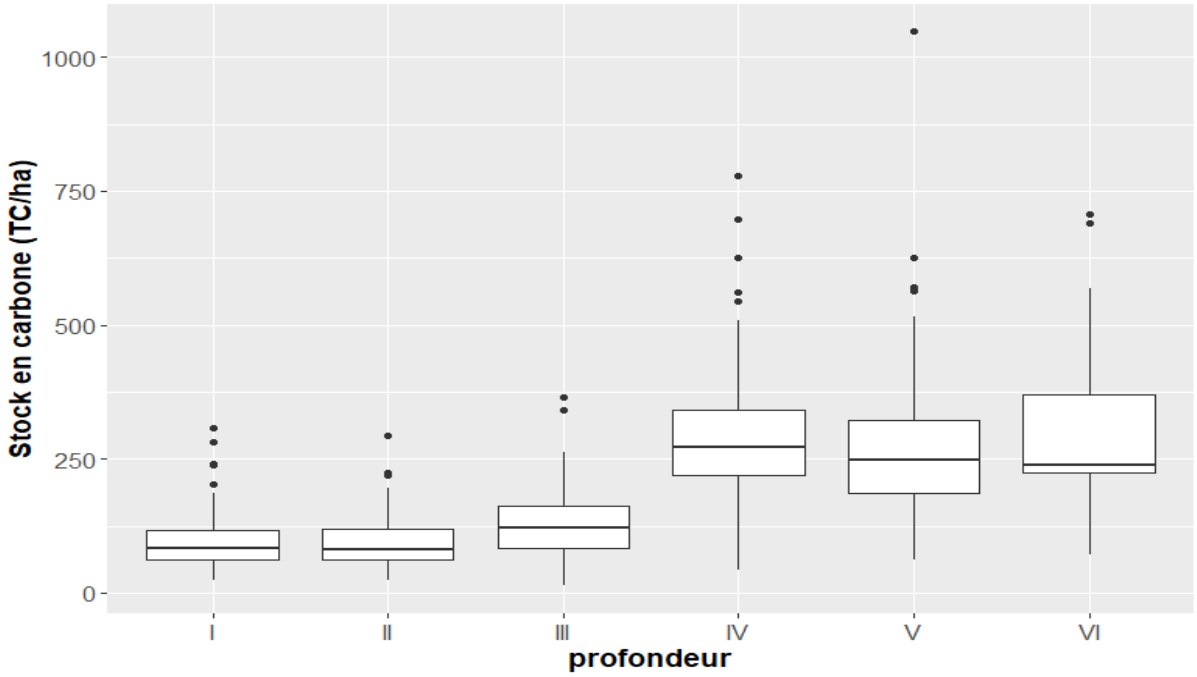


Figure 20 : *Stock en carbone dans le sol (TC/ha)*

3.4. Relation entre carbone aérienne et carbone dans le sol

La répartition de la concentration de carbone dans le sol en fonction de la concentration de carbone dans la biomasse aérienne est représentée dans la figure ci-dessus (cf. fig.21). La mise en place d'équation de régression linéaire, y= 7,0435 + 29,49 x. Ainsi, les deux paramètres ne sont pas corrélés avec r^2 = 0,04965 (p-value : 0.04795 sous Fischer).

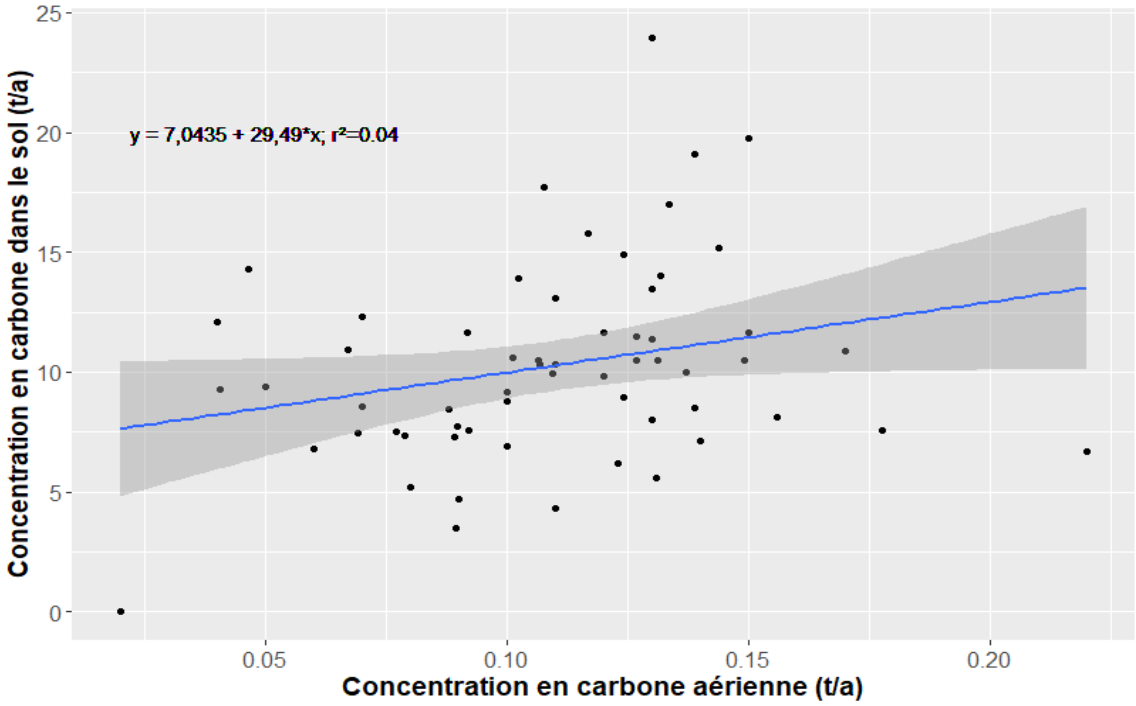


Figure 21 : *Relation entre concentration en carbone dans le sol et celle de la biomasse vivante aérienne*

4. DISCUSSION

La partie discussion comparera la méthodologie d'une part avec celles qui sont proposées par différents auteurs. D'autre part, les résultats obtenus sur la concentration en carbone dans le sol et dans la biomasse aérienne seront confrontés avec les études antérieures à Madagascar. Par ailleurs, les interactions possibles entre le crédit carbone et l'écotourisme dans la conservation seront abordées pour clôturer la discussion.

4.1. Méthodologie adoptée, est-elle la plus fiable ?

La méthode adoptée permet d'éviter de biaiser l'estimation de carbone dans le sol :

- Premièrement le choix de la température de séchage à 60°C est préconisé pour éviter la perte de carbone prématuré tandis que le standard dans les laboratoires à Madagascar est de 100°C (Fourqurean, et *al*., 2014; Rabarison, 2014; Ratefinjanahary, 2015).
- Deuxièmement le choix de limiter à 400°C la calcination permet d'éviter la perte d'eau structurelle dans l'argile, évitant ainsi une surestimation des carbones dans les échantillons. L'eau structurelle dans l'argile commence à s'évaporer autour de 450°C (Brian, 1974) et le sédiment dans l'écosystème mangrove est riche en argile (Loyer, 1985).
- Troisièmement la méthode de Loss On Ignition (LOI) est moins couteuse que celle de Walkley-Black et les études montrent qu'aucune différence statistique est observée entre les deux (Wayne, et *al*., 2019).

Les améliorations nécessaires pour une meilleur représentativité de la zone d'étude :

- Tout d'abord les quadrats dans cette étude ont été effectués dans la zone intertidale et avant mangrove à dominance *Rhizophora* et *Ceriops* où le carottage est faisable avec les matériels à disposition. Ainsi, les estimations sur l'arrière mangrove et dans les tannes sont exclues. Une meilleure représentativité des sols est donc à effectuer pour des études plus poussées. Aussi le choix d'un meilleur appareil de carottage permettant d'éviter les pertes des dernières couches de sol est à avancer.
- Ensuite la faible corrélation entre le NDVI et la biomasse peut causer une sous-estimation ou une surestimation de la biomasse totale dans le parc. La corrélation r^2=0.4749 est statistiquement acceptable pour une droite de régression linéaire. Toutefois, un meilleur ajustement est de mise pour une réelle estimation à grande

échelle. Le couplage de cette méthode avec l'utilisation de « Light Detection And Ranging» (LIDAR) peut augmenter fortement la corrélation jusqu'à 0,70 (Pham, et *al*., 2019).

- Enfin l'étude de la variation de la quantité de stockage de carbone en fonction de la diversité des espèces n'a pas été prise en compte. Or certaines études montrent que plus la végétation est diversifiée plus la concentration en carbone dans le sol est élevée (Bai, et *al*., 2021).

4.2. Quelles mesures de gestion doivent être prise face au stock de carbone ?

La mangrove dans le parc est dans un état de dégradation avancée et des mesures de restauration doivent être prise rapidement.

- Tout d'abord, la comparaison de la concentration en carbone dans la biomasse aérienne de la zone d'étude avec les autres sites montre que la concentration moyenne est inférieure à toutes les autres données dans la même partie Nord-Ouest et Ouest de l'île (Jones, et *al*., 2015; Radaniel, 2021). Par comparaison avec celle des mangroves dans la baie de Mahajamba, ces chiffres se rapprochent le plus mangrove de type arbustive à dominance sol dénudé (17,66 +/- 6,53 TC/ha) et mangrove de type dégradé à dominance de sol dénudé (9,68 +/- 2,72 TC/ha). Un rapprochement avec les mangroves de Morondava démontre que la concentration de carbone dans la biomasse avoisine celle de la parcelle de Betania (15,71 +/- 3,16 TC/ha) et révèle bien la dégradation de la mangrove du parc National de Sahamalaza-île Radama ou bien que la mangrove est en train de se renouveler (Radaniela, 2021). Toutefois, cette étude ne se concentre que sur les biomasses aériennes des mangroves vivantes, celles des arbres morts ne sont pas prises en compte. Ce qui pourrait expliquer la différence notable dans la concentration totale.
- Ensuite, pour la concentration en carbone dans le sol, cette dernière est d'autant plus élevée que lorsque les mangroves sont dégradées en même temps qu'une sédimentation très importante est observée (Ratefinjanahary, 2015; Pham, et *al*., 2019; Ravelosamiariniriana, 2021). La concentration rencontrée dans les différents sites à Madagascar est comprise entre [200 - 750] TC/ha, et en comparaison avec cette valeur celle de la présente étude est le double de la moyenne (Rabarison, 2014; Jones, et *al*., 2015; Ratefinjanahary, 2015; Ravelosamiariniriana, 2021). Ainsi, la forte concentration dans la zone d'étude peut marquer une forte dégradation de la

mangrove et que des mesures pour limiter la sédimentation dans la zone est primordial.

- Enfin, une différenciation dans la concentration de carbone en fonction de la zonation des parcelles doit être démontrée avec une plus grande concentration au niveau des noyaux durs comparée aux autres puisque les mesures de contrôle et de suivi sont plus strictes dans celles-ci (Laura & Maya, 2018). Or, seules 3 sur les 5 parcelles dans la présente étude démontrent cette affirmation. Ainsi, les mesures de conservation et d'usage dans ces zones sont à remettre en question.

4.3. Crédit carbone et écotourisme peuvent-ils être en synergie ?

Par sa singularité, écotourisme et crédit carbone s'imbriquent parfaitement pour promouvoir une conservation durable des APs.

- Pour commencer, la composante principale de l'écotourisme est la biodiversité et ses valeurs intrinsèques (Ceballos-Lascurain, 1987; Acott, et *al*., 1998). Ceballos-Lascurain en 1987 définit l'écotourisme comme un voyage vers un site intact ou préservé avec pour objectif spécifique d'étudier, d'admirer et apprécier le paysage, les plantes et animaux sauvages tout en incluant les manifestations culturelles passées et présentes dans ledit site. Par extension l'écotourisme est privilégié dans les régions naturelles intactes, vierges (Blamey, 1997; Fennell, 1998; Swarbrooke & Horner, 1999)
- Ensuite, par sa singularité l'écotourisme doit avoir un impact positif sur la conservation de la biodiversité et de la culture de son lieu d'implantation et une réduction aux stricts minimums des empreintes écologiques dans toute son intégralité (Sirakaya, et *al*., 1999; Björk, 2007; Stefan, 2007). Par ses retombés, l'écotourisme favorise des actions positives dans la protection et gestion durable des ressources créant un plus fort intérêt aux sites et aboutissant à cycle vertueux écotourisme-conservation (Wunder, 2000).
- Après, Madagascar a accès au marché carbone par l'intermédiaire du programme REDD+. Ce mécanisme REDD+ avec ses quatre principaux objectifs permet le maintien des fonctions écologiques des forêts et de la conservation de la biodiversité, la conservation et le renforcement du stock de carbone dans ces dernières, et la gestion durable des ressources forestières (Ministère de l'environnement de l'écologie et des forêts , 2018). Via le programme, le pays vend aux pays pollueurs

les carbones cumulés dans les écosystèmes désignés comme puits carbone. Pour une efficacité plus accrue de la conservation, les sites choisis pour être inscrits dans le programme doivent être des Aps ou des sites avec des formes de conservation effective, ce qui est le cas du parc national de Sahamalaza/île Radama.

- Enfin, le marché carbone et l'écotourisme sont des solutions basées sur la nature et dont l'objectif principal est de maintenir un écosystème en bonne santé pour bénéficier pleinement des services écosystémiques qui en découlent dans son intégralité (Cohen-Shacham, et *al*., 2016). Aussi dans une AP, notamment celles catégorisées en parc/parc national, ces deux composants peuvent parfaitement s'harmoniser ensemble, et même sont fortement sollicités (Dudley, 2008). Dans le cas du parc national de Sahamalaza/île Radama, leur complétion dans la conservation est très intéressante d'autant que l'écotourisme n'est qu'à un stade embryonnaire ce qui facilite la mise en place d'un programme REDD+ solide dans la région (Irène et Voahary, com. pers.). Les relations, liens et complémentarités de l'écotourisme avec le marché carbone sont résumés dans le tableau suivant (cf. tab.4).

Tableau 4 : Comparaison entre écotourisme et marché carbone (REDD+)

	Ecotourisme	Marché carbone
Zone privilégiée	Terre indigène à forte diversité (Johnston, 2000)	Zone à forte potentiel de séquestration carbone
Services écosystémiques exploités	Support, approvisionnement, culturel et régulation (Drum, 1998; Johnston, 2000; Hinch, 2001)	Support, approvisionnement et régulation (Millennium Ecosystem Assessment, 2005)
Action dans la conservation	Changement de comportement des populations locales, des visiteurs et des personnels dans le tourisme vers l'importance et pousse à agir vers la conservation (Ceballos-Lascurain, 1987)	Lutte contre la déforestation et la dégradation des forêts, conservation et amélioration des stocks de carbone, utilisation durable des ressources forestières (Ministère de l'environnement de l'écologie et des forêts , 2018 ;)
Entrée principale de devises	Touristes (Snyman, et *al*., 2020)	Pays pollueurs/payeurs (Snyman, et *al*., 2020)
Catégorie d'AP privilégiée	Ia) Réserve naturelle intégrale, Ib) zone de nature sauvage, II) parc national, III) monument naturel, IV) aire de gestion des habitats/espèces, V) paysage terrestre/marin protégé, VI) paysage harmonieux (Dudley, 2008)	Ia) Réserve naturelle intégrale, Ib) zone de nature sauvage, II) parc national, III) monument naturel, IV) aire de gestion des habitats/espèces, V) paysage terrestre/marin protégé, VI) paysage harmonieux (Dudley, 2008)

5. CONCLUSION

L'objectif de cette recherche est de déterminer la quantité de carbone stockée dans la biomasse aérienne ainsi que dans le sol dans l'écosystème mangrove du parc National de Sahamalaza/île Radama. Les résultats, obtenus d'octobre à décembre 2021, sur la productivité primaire montrent que l'allure générale des mangroves dans le parc national de Sahamalaza/île Radama est dégradée avec dominance de sol dénudé. Son stock de carbone dans la biomasse aérienne, 5,453 +/- 3,0517 TC/ha, est inférieur aux mangroves des régions avoisinantes. Toutefois, le stock de carbone dans le sol, valeur autour de 1 026,44 +/- 415,74 TC/ha, est le double de ceux environnants. Ces données suggèrent une dégradation de la mangrove et une forte sédimentation dans la région. Ainsi, l'évaluation du stock de carbone dans un écosystème est une technique rapide permettant de connaitre l'état de santé de ce dernier.

En dépit de la faible productivité de la mangrove de la zone d'étude, les analyses statistiques sur l'uniformité montrent que les zones protégées hors du noyau dur ont le plus fort potentiel de stockage que les noyaux durs et les zones d'utilisation contrôlées en raison de sa grande superficie même si la moyenne de concentration au niveau des noyaux durs est la plus élevée. Ainsi, une réaffectation des zonations du parc est à envisagé pour une meilleure gestion de cette zone. Aussi, une amélioration de la gestion est nécessaire si l'hypothèse de vouloir mettre le crédit carbone comme source de financement alternative est de mise. Des changements au sein de cet écosystème sont présents et que si la mangrove revient dans ses conditions antérieures, le stock de carbone en sera plus qu'amélioré. Aussi, la majeur partie du stock de carbone se situe au niveau du sédiment.

La relation entre l'écotourisme et le marché carbone démontre que le business de la conservation doit être l'objet d'une approche holistique pour une conservation durable et plus résilient face aux aléas. Dans un contexte où l'écotourisme est constamment mis en difficulté, le marché carbone, autre forme de payement des services écosystémiques, est un levier solide permettant la conservation tout en incluant la population locale dans ces retombés économiques et environnementaux. Toutefois, le marché carbone n'est pas un alternatif à l'écotourisme mais plutôt un allié solide.

Toutefois quelques recommandations sont à avancer :

- Les recherches sur les mangroves connaissent une avancée actuellement surtout pour celles à Madagascar. Des équations allométriques spéciales sont en cours d'élaboration et seront disponible d'ici 2023. Ainsi, l'emploie de ces équations dans les futures recherches est de mise ;
- La méthode LOI est très consommatrice de temps comparée aux autres méthodes d'estimation de stock de carbone dans le sol. L'utilisation de la méthode spectrométrie en moyen infrarouge (SMIR) couplée avec LOI permettra de réduire le temps d'analyse de près de 100 échantillons par jours contre 30 échantillons par semaine ;
- Une extension des zones d'investigation pour permettre une meilleure représentativité des résultats pourra aboutir à la mise en place de base de données pour une estimation à grande échelle dans toute la réserve de biosphère de Sahamalaza. Cela est possible notamment par l'approche du deep learning en informatique. Permettant un suivi temporel de l'écosystème et de son stock de carbone par les images satellitaires (Arsalan, et *al*., 2021; Tien, et *al*., 2021);
- Un meilleur équipement au sein du laboratoire de l'institut et de meilleur équipement de carottage pour éviter la perte des dernières couches de sol ;
- Enfin inclure les biomasses mortes dans les estimations, inclure des plots permanents pour le suivi régulier du stock et faire des recherches approfondies sur le composant écotourisme dans la région ;

L'extrapolation des résultats dans cette étude se base sur la productivité primaire qui est par la suite liée à la biomasse. Toutefois, les biomasses issues des arbres morts n'y sont pas incluses. A partir de l'utilisation de NDVI et MVI, ces dernières ne sont pas catégorisées mangroves. Or des quantités importantes de carbone y sont renfermées et que leur suivi est important pour l'évaluation de l'état de santé des mangroves. Ainsi, la mise en place d'autre méthode permettant de distinguer la biomasse issue des arbres morts par télédétection n'est-elle pas primordiale ?

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Acoot TG, La Trobe HL, Howard SH (1998) An evaluation of deep ecotourism and shallow ecotourism. Journal of sustainable Tourism 6(3) : 238-253.

Alvin BB, Blancoa CA, Rhommel CR, Ana S, Nadaoka K (2020) Development and application of new mangrove vegetation index (MVI) for rapid and accurate mangrove mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, pp. 95-117.

Arsalan G, Zaghian S, Mohammadi AR, Amani M, Mohammadzadeh A, Jamali S (2021) Mangrove ecosystem mapping using sentinel-1 and sentinel-2 satellite images and random forest algorithm in google earth engine. *Remote Sensing* 13, 13.

Bai J, Meng Y, Gou R, Lyu J, Dai Z, Diao X, Zhang H, Luo Y, Zhu X, Lin G (2021) Mangrove diversity enhances plant biomass production and carbon storage in Hainan island, China. Functional Ecology 35 : 774–786.

Blamey RK (1997) Ecotourism: the search for an operational definition. Journal of Sustainable Tourism 5(2): 109–130.

Björk P (2007) Definition paradoxes: from concept to definition. In: Higham J (eds) Critical issues in ecotourism understanding a complex tourism phenomenon. Elsevier, Oxford, pp 23-45

Brian ED (1974) Loss-on-ignition as Estimation of Soil Organic Matter. *Soil Science Society of American Journal* 38, 1 : 150-151.

Brimont L, Ezzine-de-Blas D, Karsenty A, Toulon A (2015) Achieving conservation and equity amidst extreme poverty and climate risk: the Makira REDD+ Project in Madagascar. *Forests* 6, 3: 748–768.

CDB (2019) Synthesis of views of parties and observers on the scope and content of the post-2020 global diversity framework. CDB, p 19.

Ceballos-Lascurain H (1987) The future of ‘ecotourism’. Mexico Journal pp 13-14.

Cohen-Shacham E, Walters G, Janzen C, Maginnis S (2016) Nature-based Solutions to address global societal challenges. IUCN, Gland, Switzerland. DOI:10.2305/IUCN.CH.2016.13.en

Danny H, Ivanic K (2015) Values and benefits of protected areas. In: Michale L, Ashish K, Sue F, Ian PGL, Worboys LG, Lockwood M, Kothari A, Feary S, Pulsford I(eds) Protected area governance and management. ANU Press, The Australian National University, Canberra, Australia pp 147-168.

De Wasseige C, Tadoum M, Atyi E, Doumenge C (2015) The forests of the Congo Basin. Forests and climate change. Weyrich, Belgium p 128.

Dino D, Gasparovic M, Medak D (2021) Sentinel-1 and 2 Time-Series for Vegetation Mapping Using Random Forest Classification: A Case Study of Northern Croatia. *remote sensing* 13 .

Doumenge C, Michel B, Poliwa R, Breuer T, DeChassey E, Ngoga T, Arranz L (2020) Ecotourisme et aires protégées en afrique centrale: un avenir en commun. In : Doumeng C, Palla F, Itsoua Madzous GL (eds)Aires protégés d'Afriques centrale : état 2020. OFAC-COMIFAC, Yaoundé, Cameroun, IUCN, Gland, Suisse pp 312-353.

Drumm A (1998) New approaches to community-based ecotourism management: learning from Ecuador. In: Lindberg K,Epler Wood M, Engeldrum D (eds) Ecotourism: A Guide for Planners and Managers, Vol. 2. The Ecotourism Society,Vermont, pp. 197–213.

Dudley N (2008) Guidelines for Applying Protected Area Management Categories . IUCN, Gland (Suisse), pp 86-102.

Eba'a AR, Guillaume L, Jonas PN, Thérèse FM (2013) Etude de l'importance économique et sociale du secteur forestier et faunique au Cameroun. Center for International Forestry Research, p268.

Edward BB, Hacker DS, Kennedy C, Koch WE, Stier CA, Silliman RB (2011) The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs* 81(2) : 169-193.

Fennell DA (1998) Ecotourism in Canada. Annals of Tourism Research 25(1) : 231–234.

Fourqurean J, Kauffman JB, Kennedy H, Lovelock C, Megonigal JP, Rahman A, Saitilan N, Simard M (2014) Coastal blue carbon methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows. Conservation International, IOC-UNESCO, IUCN. pp 39-90.

Gautier LC, Chatelain R, Spichiger (1994) Presentation of a releve method for vegetation studies based on high-resolution satellite imagery. *In: J. H. Seyani and A. C. Chikuni (eds). in 13th plenart meeting of AETFAT, Zomban Malawi 1991, 30p*.

Giri C, Muhlhausen J (2008) Mangrove Forest Distribution and Dynamics in Madagascar (1975–2005). *Sensor*, pp 204-217.

Hinch T (2001) Indigenous territories.In: Weaver DB (ed.) The encyclopaedia of ecotourism. CABI, Wallingford, UK, pp. 345–357.

Instat (2021) Etude Nationale, Publication trimestrielle. *Tableau de bord économique* 42: 43.

Jacques I (1995) Quelques aspects caractéristiques des mangroves de Madagascar. *Bulletin de l'académie nationale malgache, ORSTOM* (Bu), Numéro spécial : 61-67.

Johanna E, Jones JPG, Räsänen M, Geldmann J, Jokinen A, Pellegrini A, Rakotobe D, Rakotonarivo OS, Toivonen T, Balmford A (2021) Elevated fires during COVID-19 lockdonw and the vulnerability of protected areas. *Nature sustainability* 5 : 603-609.

Johnston A (2000). Indigenous peoples and ecotourism: bringing indigenous knowledge and rights into the sustainability equation. Tourism Recreation Research 25(2): 89–96

Jones TG, Ratsimba HR, Glass L, Benson L, Teoh M, Carro A, Cripps G, Giri C, Gandhi H (2015) The Dynamics, Ecological Variability and Estimated Carbon Stocks of Mangroves in Mahajamba Bay, Madagascar. *J. Mar. Sci. Eng*, 3 : 793-820.

Kamga KSL, Ngar-Odjilo M, Njamen B, Piga B, Poliwa RC, Tabapssi T (2020) Le Covid-19 : impacts sur le tourisme en Afrique centrale et mesures de relance. RETAC, Yaoundé, Cameroun,30p .

Kauffman JB, Heider C, Cole TG, Dwire KA, Donato DC (2011) Ecosystem carbon stocks of Micronesian mangrove forests. Wetlands, Volume 31, pp.343-352.

Kauffman JB(2012) Technical and scientific aspects of sources, sinks and reservoirs of all GHSS for coastal and marine ecosystems. *Coalition for rainforest nations, Oregan State University, CIFOR, Illahee Sciences International*, 15p.

Laura B, Maya L (2018) Le mécanisme REDD+ et les projets pilotes à Madagascar : d'un idéal incitatif à la réalité des dispositifs de gestion. *Natures Sciences Sociétés, EDP Sciences*,26 (3): 308-319.

Loyer JY (1985) La mise en valeurs des sols des mangroves tropicales en relation avec leurs caractéristiques physico-chimiques. In : UNESCO (eds) Atelier régional UNESCO-COMAR estuaire et la mangrove du Suie Saloum (Sénégal), Sénégal, Dakar, pp 43-47.

Luis C, Paule G, Benjamin L, Gonzalo O (2023) Filling the gap in financing conservation. Learinings from the MAVA Fondation. MAVA fondation pour la nature. 43p

Maxwell SL, Dudley N, Hoffman M, Rodrigues ASL, Stolton S, Visconti P, Woodley S, Kingston N, Lewis E, Maron M, Strassburg BBN, Wenger A, Jonas HD, Venter O, Watson JEM (2020) Area-based conservation in the twenty-first century. *Nature* 586 : 217-227.

Meral P, Andriamahefazafy F , Rabearisoa A (2008) Le financement des aires protégées à Madagascar: de nouvelles modalités. In: Aubertin C., Rodary E. Aires protégées: espaces durable? *Marseille: IRD*, pp 135-155.

Millennium Ecosystem Assessment (2005) Ecosystems and human wellbeing: synthesis. Wordl Ressources Institute, Washington DC, 102p.

Ministere de l'économie et des finances (2020) Impact du coronavirus sur l'économie malagasy, comment le Coronavirus a affecté la situation économique malagasy? Rapport trimestriel p 10.

Ministère de l'environnement, de l'écologie et des forêts (2018) Stratégie nationale REDD+ Madagascar. Décret N°2018-500 du 30 mai 2018, 44p.

ONE (2019) Evaluation Environnementale et Sociale Stratégique du programme REDD+ de Madagascar. Rapport d'Etude, Bureau National de Coordination REDD+, Forest Carbon Partnership, Banque mondiale, 263p.

Pearson T, Walker S, Bronw S (2005) Sourcebook for land use, land-use change and forestry projects. In: Fourqurean J, Kauffman JB, Kennedy H, Lovelock C, Megonigal JP, Rahman A, Saitilan N, Simard M (eds) Coastal blue carbon methods for assessing

carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows. Conservation International, IOC-UNESCO, IUCN. pp 73.

Pham TD, Naoto Y, Dieu TB, Kunihiko Y, Daniel AF (2019) Remote sensing approaches for monitoring mangrove species, structure, and biomass: opportunities and challenges. *MDPI, remote sensing* 11, 230 : 24.

Philippe M, Requier-Desjardins D (2006) La gestion durable de l'environnement à Madagascar : enjeux, opportunités et contraintes. *economie rurale*, pp 294-295.

Prato T, Fagre (2014) Protected area management. *Encyclopedia of Natural Resources*, pp 385–388.

Rabarison HS (2014) Analyse comparative du stock de carbone sous mangrove par la méthode Loss On Ignition (L.O.I.) et Walkley-Black (W.B.) et étude des facteurs de stockage de Carbone organique du sol dans la baie d'Ambora-Ambanja. Msc, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieur des Sciences Agronomiques p 64.

Radaniela AB (2021) Evaluation des stocks de carbones dans les biomasses aériennes et racinaires des mangroves de la région Menabe: cas des Communes Belo sur Mer et Morondava. Msc, Ecole Supérieur des Sciences Agronomiques et Environnemetales, Université d'Antananarivo p 54.

Rasolofo VM (2021) Etude écologique des ressources crevettières dans les mangroves de la Baie d'Ambora (Nord Ouest de Madagascar); en vue d'une gestion durable de leur exploitation. PhD, Université d'Antananarivo p 213.

Ravelosamiariniriana KK (2021) Evaluation du stock de carbone organique des sédiments des mangroves du menabe: Cas des mangroves de Morondava et de Belo sur mer. Msc, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieur des Sciences Agronomiques,p 55.

Shapiro A, Randriamanatena D, Kuechle H, Razafindramasy F (2019) Les mangroves de Madagascar: superficies, condition et évolution 2000-2018. WWF Germany, Berlin, and WWF Madagascar, Antananarivo, p 39.

Sirakaya E, Sasidharan V, Sönmez S (1999) Redefining ecotourism: the need for a supply-side view. Journal of Travel Research 38: 168–172.

Snyman S, Sumba D, Vorhies F, Gitari E, Enders C, Ahenkan A, Pambo AFK, Bengone N (2021) State of the wildlife economy in Africa. African Leadership University, School of Wildlife Conservation, Kigali, Rwanda, pp 32-164

Spalding MD, Blasso F, Field CD (1997) World mangrove atlas. The International Society for Mangrove Ecosystems, Okinawa, Japan, pp.1-30.

Spalding MMK, Lorna C (2010) World atlas of mangroves. New York NY: Earthscan, pp. 1-22.

Stefan G (2007) Ecotourism and global environmetal change. In: Higham J(eds) Critical issues in ecotourism: understanding a complex tourism phenomenon. Elsevier, Oxford pp 71-84.

Stephanie M, Dudley N (2008) Public funds to protected areas. *Technical Report*, p 27.

Swarbrooke J, Horner S (1999) Consumer behaviour in tourism. Butterworth-Heinemann, Oxford.

Tien DP, Naoto Y, Thi TTN, Nga NL, Nam TH, Junshi X, Wataru T, Tien DP (2021) Improvement of mangrove soil carbon stocks estimation in north Vietnam using sentinel-2 data and machine learning approac. Giscience & remote sensing 58, 1: 68-87.

UICN/PAPACO (2010) Forum des ONG environnementales de l'Afrique de l'Ouest. Rapport de capitalisation. UICN, Gland, Suisse et Cambridge, Royaume-Un.

Wayne RR, Robarge WP, Osmond DL, Heitman LJ (2019) Comparing four methods of measuring soil organic matter in north Carolina soils. *Soil Science Society pf America Journal*, 83: 466-474.

Weiskopf SR, Janet AC, Toni LM, Bonnie JEM (2021) Climate change risks and adaptation options for Madagascar. *Ecology and Society* 26, n° 4.

Worboys GL, Lockwood A, Feary S, Pulsford I, Hockings M, Leverington F, Cook C (2019) Protected Area Management Effectiveness. In: Worboys GL, Lockwood M, Kothari A, Feary S, Pulsford I (eds) Protected area governance and management. Australian National University, Canberra, Australia, pp 891-928.

Worthington T, Mark S (2018) Mangrove restoration potential. IUCN, University of Cambridge, The Nature Conservancy, p 34.

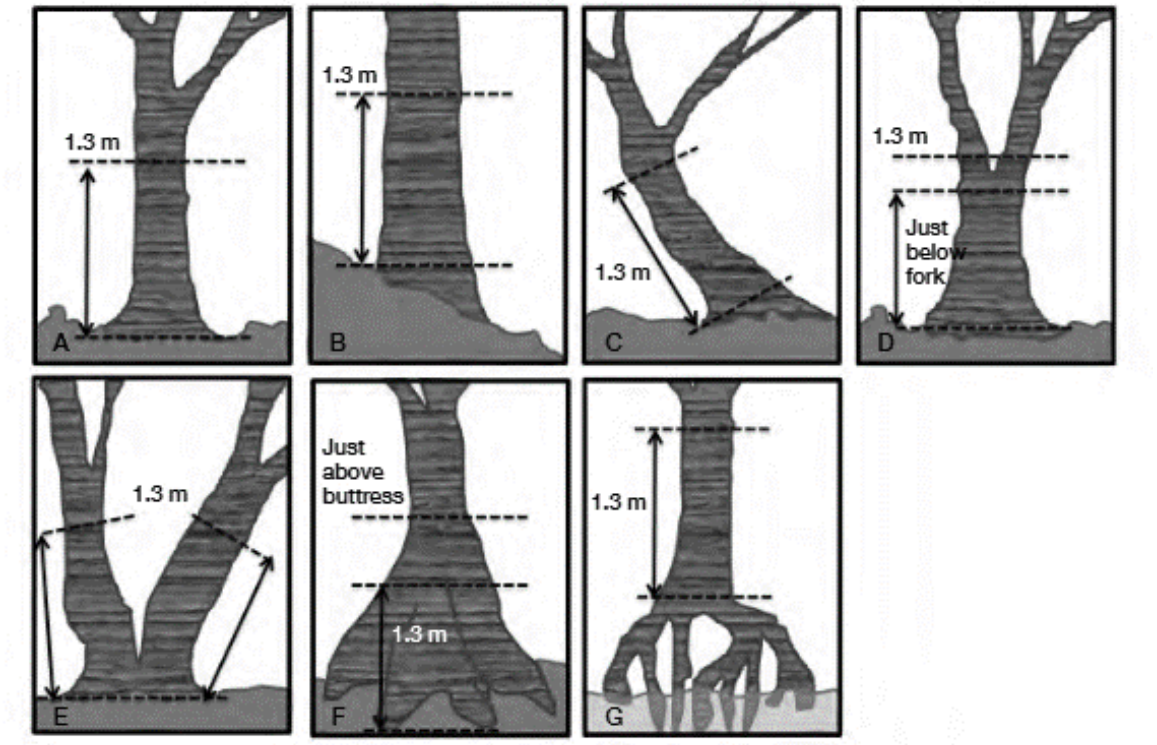
WTTC (2019) The economic impact of global wildlife tourism, Travel & tourism as an economix tool for the protection of wildlife. WTTC, London p 29.

WTTC (2020) Travel & tourism Global economic impact & trends 2020. WTTC, London, p 22.

Wunder S (2000) Ecotourism and economic incentives: an empirical approach. Ecological Economics 32: 465–479.

ANNEXES

Annexe 1 : Estimation de la DHP (source : Pearson et al. 2005)



Annexe 2 : Densité apparente du sol

Quadrat	0-15	15-30	30-50	50-100	100-150	150-200
1	1,31780979	1,25866351	1,05355399	1,1698664	1,27967114	
2	1,30535283	1,34756394	1,23901008	1,04410253	1,23356932	0,95948466
3	1,36487136	1,37989209	1,38407209	1,06132497	1,28561858	
4	1,03563298	1,14656666	1,18601389	0,87852962	1,19914219	
5	1,24603744	1,50683125	0,90828977	1,15111792	1,1625625	
6	1,0361928	0,99100743	1,22520643	1,17114358	1,17045999	0,95316757
7	0,92929345	0,98576263	1,08646731	1,13993783	1,140393	1,1523283
8	0,84064988	1,01682828	1,11441537	1,27506602	1,37323376	0,95857222
9	1,01096024	1,15930206	1,10506618	0,85647098	1,30714903	1,06002384
10	1,06921143	0,98391026	1,1010126	1,20641791	1,04723246	0,81002286
11	1,035377	1,01443142	1,29600093	1,06124131	0,88791958	
12	1,15169465	1,1428129	1,39006474	1,22503126	1,01169819	1,11281664
13	1,46266855	1,08099672	1,20178748	1,15886017	0,91548918	0,98781867
14	1,476694	1,17916586	1,07009764	1,07331488	0,92349535	
15	1,36570203	1,05574912	1,3236397	1,34275224	1,17681746	
16	0,86034889	0,90254038	1,08350708	1,0856038	0,88398454	1,18932147
17	1,08656751	1,10933576	1,27236347	1,40953089	0,75279282	1,08230015
18	1,15860374	1,1385676	1,18608852	1,42806157	1,04403066	0,8826806
19	1,19590881	1,28832998	1,20821193	1,25328899	0,86234049	1,22276643
20	1,22584386	1,09660573	1,29705324	1,39848322	1,19926426	1,05456191
21	1,44784843	1,19367799	1,21291982	1,16214939	1,28396659	
22	1,08503882	1,12382488	1,14605883	1,16571447	1,15275925	1,3612204
23	1,43457491	0,80320725	1,27331912	1,08225361	1,20599658	

24	1,28522391	1,28391884	1,18829855	1,08145784	1,07526671	
25	1,05951037	1,07708108	1,0731977	0,97700445	1,25659194	1,39394265
26	1,53708661	1,45295731	1,09006812	1,67664958	1,51887928	
27	1,56972929	1,69431578	1,49257097	1,41334364	1,3453049	
28	1,41189533	1,50683125	1,49529252	1,44197562	1,43546618	
29	1,31516096	1,29611011	1,21861757	1,14838249	1,00781685	
30	1,37113575	1,21697827	0,98252713	1,23281419	1,23305292	
31	1,27906462	0,98020346	1,15104038	1,17193742	1,191227	
32	1,01013414	1,06853446	0,82906993	1,20405489	1,1826963	1,31956955
33	1,25016049	0,84040176	1,1191139	1,0697122	1,48423125	1,33050349
34	1,11468143	1,1634863	1,00525445	1,18258489	1,0982646	1,4874621
35	1,06589248	0,9790098	1,05790291	1,0162998	1,22856475	1,33020405
36	1,06554234	1,01497882	1,05010431	1,13921517	0,81535077	
37	1,05150488	0,68691273	0,89704501	1,15194756	1,25414095	
38	1,27099546	0,94039881	1,06291629	0,89699726	1,42002815	
39	1,20979402	0,96871248	0,92101374	1,22612968	1,39362434	
40	1,27107822	0,99159896	1,06030615	1,12173995	1,15560813	
41	0,76114614	0,66393885	0,89091603	0,81877341	0,71921262	
42	0,6840777	0,7552087	0,82094509	0,83607104	1,01712182	1,19815511
43	0,89745687	0,73151308	0,88864795	1,12959525	0,72807022	
44	1,04634304	1,21072632	0,95927958	1,14780942	0,68451741	
46	0,846722	0,83605249	0,99880543	1,12076987	1,12236482	
47	1,29847389	0,90019561	0,92006052	1,13482495	1,20569253	
48	1,08803514	0,71533145	0,92739374	1,05721762	1,35944755	
49	1,21130985	1,23238375	1,1018686	1,21355583	1,03408762	
50	1,56539571	1,16439379	1,04545513	1,12418552	0,89692307	1,11023418
51	1,20148873	1,00976879	0,94657647	0,68584741	1,17360819	1,07447734
52	0,87524173	0,77172891	1,04434301	1,06462186	0,89422539	1,10217141
53	1,85470535	1,13163649	1,23158659	1,54264309	0,91460964	
54	1,42984897	1,18635726	1,21871078	0,95011195	1,05969012	1,1216235
55	1,34365196	1,09845897	1,30747156	1,41775019	1,03695474	1,16955946
56	0,88858511	1,12858752	1,58682324	0,90300302	0,97831342	
57	1,51522543	1,13398522	1,59370585	1,38402249	1,50531512	
58	1,29710679	0,99812316	1,13015061	1,52417191	1,79653037	1,03014296
59	0,98978975	1,02773903	1,08327046	1,210983	1,82966317	1,45621637
60	1,10038272	0,95266175	1,10217786	0,87882863	1,57370769	1,14417253

Site	Profondeur	Densité	Ecartype
Ampasimbezo	0-15	1,15877106	0,18672569
	15-30	1,1186233	0,13317854
	30-50	1,18659612	0,12230277
	50-100	1,1695073	0,15710292
	100-150	1,09284322	0,17543952
	150-200	1,03275887	0,1212284
Ankitsika - Tanandava	0-15	1,25530262	0,17070718
	15-30	1,11415702	0,24676305
	30-50	1,11633187	0,17048208

b

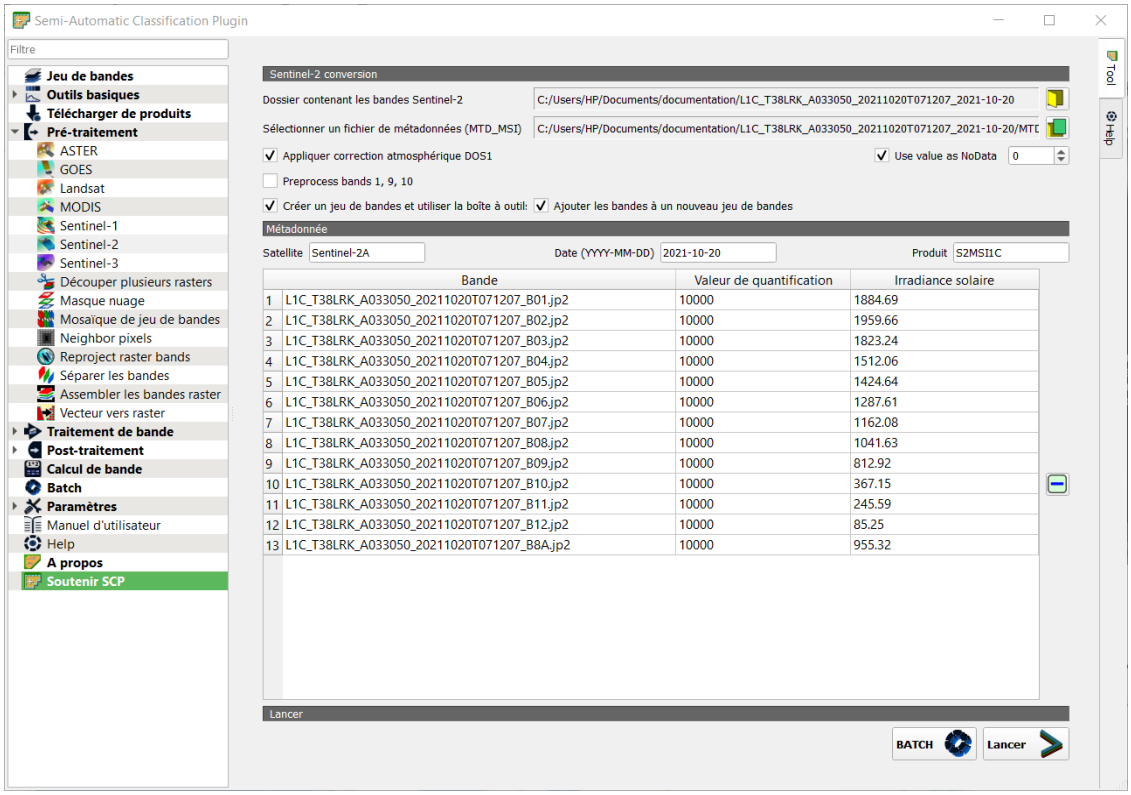
	50-100	1,17811821	0,17200502
	100-150	1,23694187	0,16985183
	150-200	1,37048371	0,0634558
Maromandia	0-15	1,15236773	0,30540935
	15-30	0,98151532	0,18755996
	30-50	1,0946415	0,21652925
	50-100	1,1128835	0,23787019
	100-150	1,13316082	0,33954883
	150-200	1,15630587	0,12292759

Annexe 3 : Différentes bandes dans sentinelles 2 (source : Wikipédia, 2022)

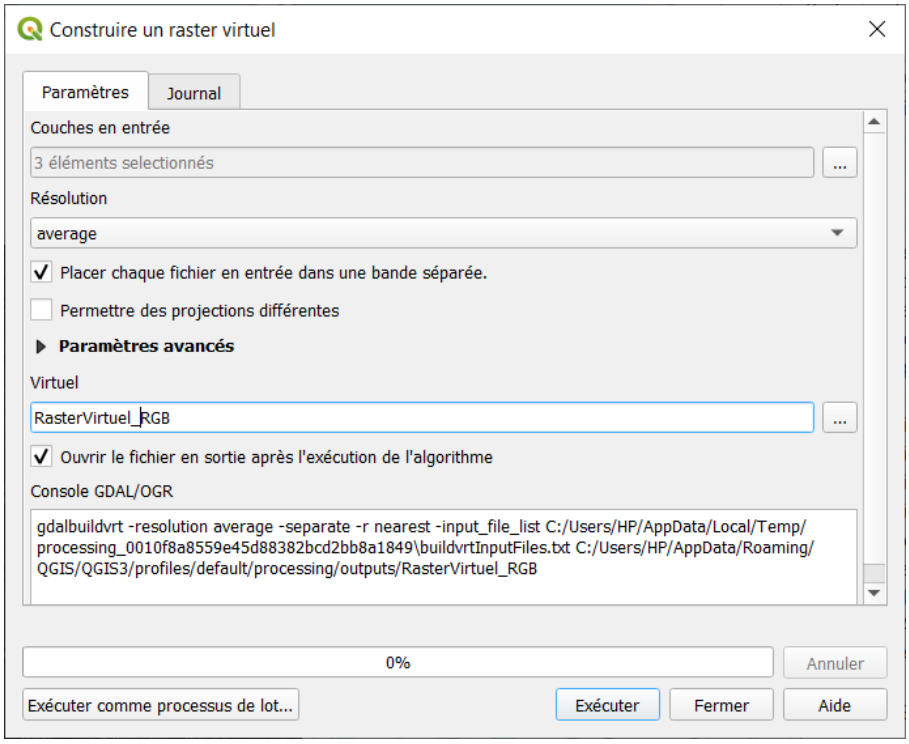
Numéro de bande	Type
Bande 1	Coastal aerosol
Bande 2	Blue
Bande 3	Green
Bande 4	Red
Bande 5	Vegetation red edge
Bande 6	Vegetation red edge
Bande 7	Vegetation red edge
Bande 8	NIR
Bande 8a	Narrow NIR
Bande 9	Water vapour
Bande 10	SWIR -circus
Bande 11	SWIR
Bande 12	SWIR

Annexe 4 : Traitement d'image satellitaire pour sentinelle 2

- Correction atmosphérique sous SCP des couches

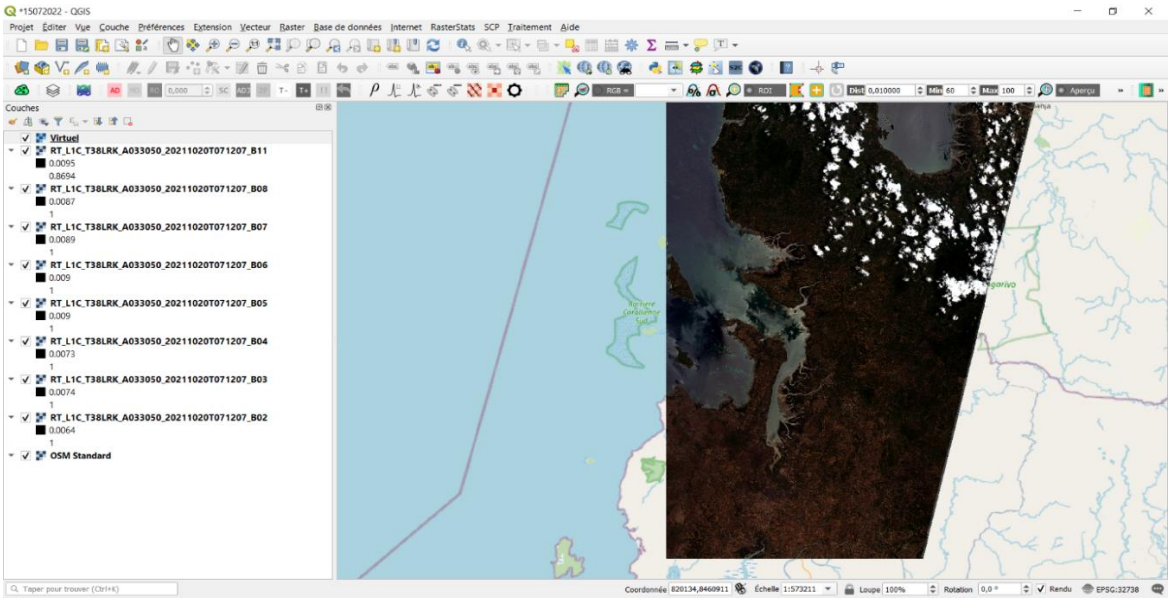


- Construction d'un raster virtuel RGB pour faciliter la classification

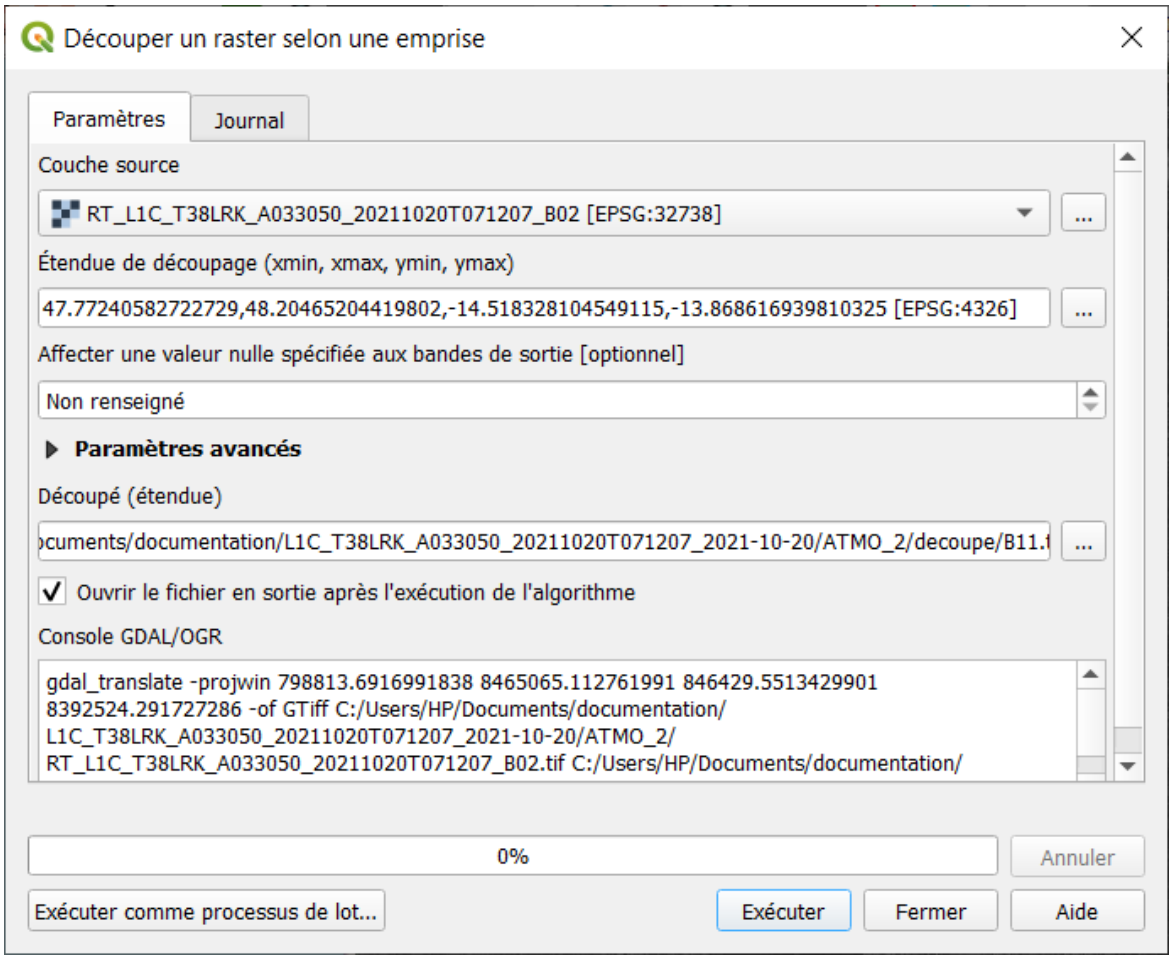


d

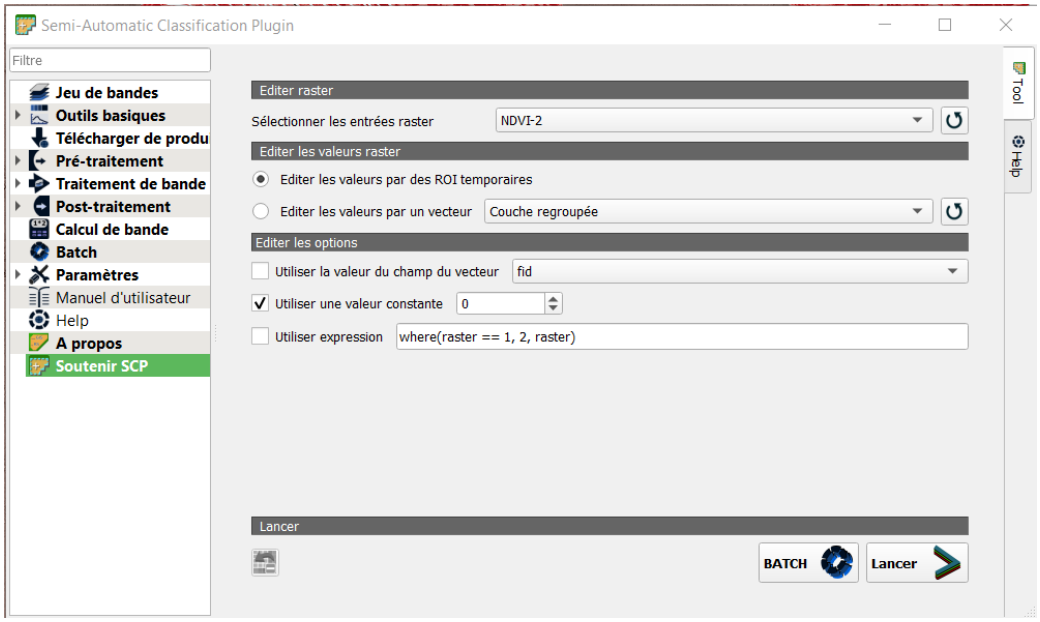
- Bande virtuelle avec vrai couleur



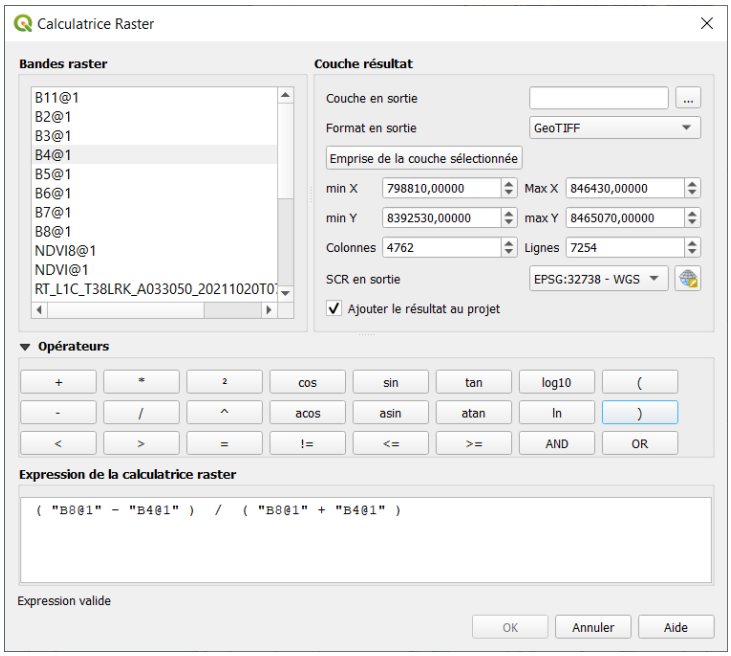
- Découpe du raster selon la zone d'intérêt



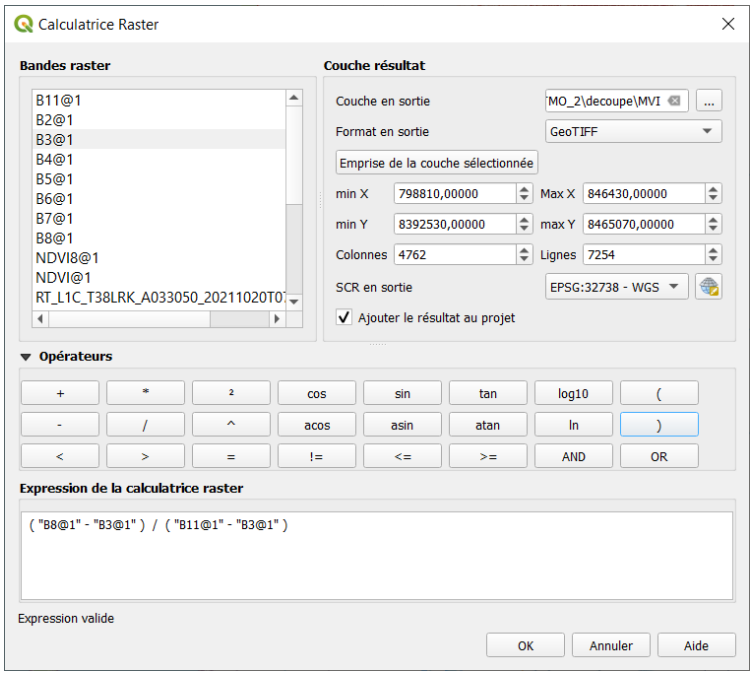
- Classification semi-supervisée sous QGIS



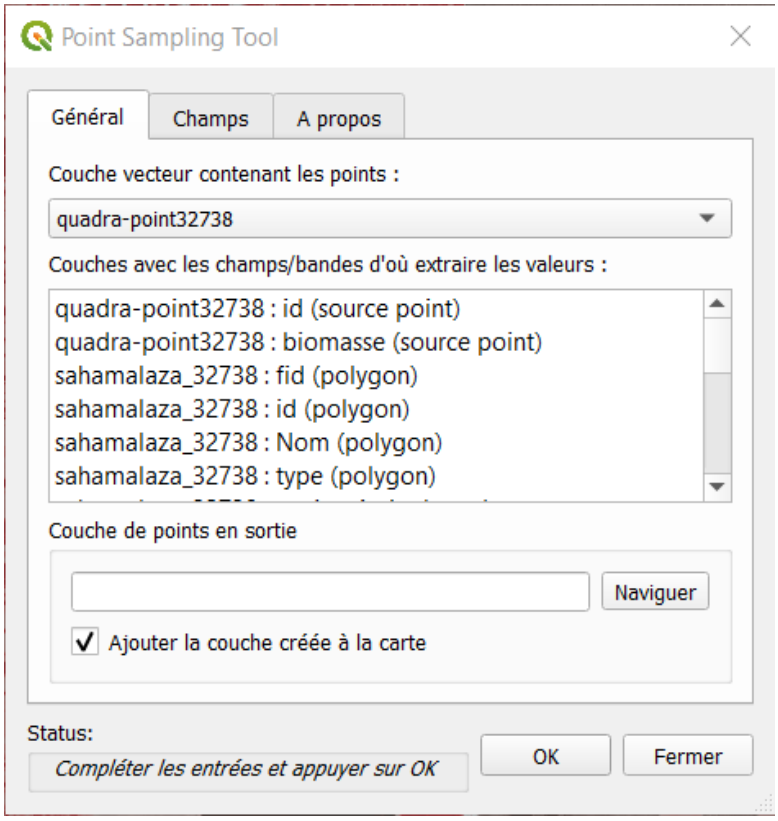
- Création de raster NDVI



- Création de raster MVI



Annexe 5 : Extraction des valeurs NDVI



- Les quantités de biomasses par quadrats avec leur valeur NDVI respective

Nom		Latitude		Longitude	NDVI	Biomasse
P1 Q1	S	14°18.216	E	48°01.886	0,53096	0,08968178
P1 Q2	S	14°18.206	E	48°01.894	0,60843	0,13184238
P1 Q3	S	14°18.203	E	48°01.910	0,59773	0,10636
P1 Q4	S	14°18.202	E	48°01.916	0,6695	0,10961391
P1 Q5	S	14°18.195	E	48°01.930	0,65953	0,13543498
P1 Q6	S	14°18.133	E	48°01.849	0,53235	0,08912163
P1 Q7	S	14°18.099	E	48°01.840	0,64523	0,11663118
P1 Q8	S	14°18.079	E	48°01.841	0,45142	0,04646136
P1 Q9	S	14°18.059	E	48°01.840	0,55821	0,13348386
P1 Q10	S	14°18.040	E	48°01.837	0,53392	0,07702272
P1 Q11	S	14°17.395	E	48°01.886	0,6875	0,177875
P1 Q12	S	14°17.400	E	48°01.883	0,6535	0,123831
P1 Q13	S	14°17.410	E	48°01.873	0,45031	0,04009717
P1 Q14	S	14°17.409	E	48°01.856	0,29985	0,06692921
P1 Q15	S	14°17.409	E	48°01.847	0,30941	0,04049122
P1 Q16	S	14°17.475	E	48°01.962	0,58042	0,14917493
P1 Q17	S	14°17.481	E	48°01.963	0,5715	0,137019
P1 Q18	S	14°17.487	E	48°01.964	0,40788	0,10246657
P1 Q19	S	14°17.489	E	48°01.979	0,64179	0,10754811
P1 Q20	S	14°17.495	E	48°01.986	0,63489	0,14388074
P2 Q1	S	14°22.311	E	47°58.982	0,60227	0,09212678
P2 Q2	S	14°22.327	E	47°58.987	0,64465	0,10661574
P2 Q3	S	14°22.341	E	47°58.991	0,64599	0,12683334
P2 Q4	S	14°22.351	E	47°58.999	0,63582	0,14412812
P2 Q5	S	14°22.367	E	47°59.002	0,68416	0,13698656
P2 Q6	S	14°22.259	E	47°58.983	0,6074	0,1265684
P2 Q7	S	14°22.250	E	47°58.991	0,63926	0,15504316
P2 Q8	S	14°22.237	E	47°58.998	0,50326	0,07886716
P2 Q9	S	14°22.195	E	47°58.978	0,65904	0,12030464
P2 Q10	S	14°22.195	E	47°58.970	0,58124	0,13960984
P3 Q1	S	14°13.131	E	48°00.732	0,62123	0,1554831
P3 Q2	S	14°13.149	E	48°00.711	0,54455	0,1298503
P3 Q3	S	14°13.172	E	48°00.708	0,63544	0,12649669
P3 Q4	S	14°13.182	E	48°00.700	0,48681	0,11823198
P3 Q5	S	14°13.179	E	48°00.689	0,58979	0,10188414
P3 Q6	S	14°12.930	E	48°00.542	0,52576	0,12485216
P3 Q7	S	14°12.920	E	48°00.537	0,49659	0,09074567
P3 Q8	S	14°12.909	E	48°00.545	0,44783	0,1229259
P3 Q9	S	14°12.905	E	48°00.554	0,55828	0,09350248
P3 Q10	S	14°12.883	E	48°00.546	0,40824	0,09359184
P3 Q11	S	14°12.885	E	48°00.541	0,59416	0,1136745
P3 Q12	S	14°12.885	E	48°00.538	0,63516	0,12855191
P3 Q13	S	14°12.902	E	48°00.535	0,61755	0,15584218
P3 Q14	S	14°12.924	E	48°00.555	0,52795	0,1338899
P3 Q15	S	14°12.936	E	48°00.554	0,38764	0,03660726

P3 Q16	S	14°12.949	E	48°00.560	0,52353	0,09636603
P3 Q17	S	14°12.959	E	48°00.563	0,59627	0,14613916
P3 Q18	S	14°12.870	E	48°00.568	0,68432	0,18322388
P3 Q19	S	14°12.982	E	48°00.580	0,68285	0,13534902
P3 Q20	S	14°12.983	E	48°00.587	0,67336	0,16163248
P2 Q11	S	14°22.285	E	47°58.821	0,60068	0,10478088
P2 Q12	S	14°22.302	E	47°58.823	0,53763	0,08800958
P2 Q13	S	14°22.317	E	47°58.816	0,57912	0,10526996
P2 Q14	S	14°22.331	E	47°58.810	0,63117	0,16330828
P2 Q15	S	14°22.346	E	47°58.797	0,57753	0,13169531
P2 Q16	S	14°22.355	E	47°58.788	0,67579	0,11395695
P2 Q17	S	14°22.370	E	47°58.797	0,7048	0,18036746
P2 Q18	S	14°22.382	E	47°58.801	0,56381	0,14107062
P2 Q19	S	14°22.387	E	47°58.815	0,74616	0,15723013
P2 Q20	S	14°22.396	E	47°58.836	0,7424	0,09924421

Annexe 6 : Valeurs issues de l'extraction par Statistical zone et biomasse résultant

Nom	Catégorie	NDVIcount	NDVIsum	NDVImoyen	NDVImin	NDVImax	NDVIvariance	Biomasse total (T)
Ampasimbezo	Zone protégée	157152	74116,91453	0,471625652	-0,319444448	0,814526081	0,015110337	17936,27092
Ampasimbezo	Noyau dur	10794	4703,555642	0,435756498	-0,096774168	0,755575359	0,00955748	1138,238065
Ampasimbezo	Noyau dur	16763	8524,298677	0,508518683	-0,233201593	0,782873154	0,010560079	2062,85788
Ampasimbezo	Noyau dur	16348	8072,220183	0,493774173	-0,187732369	0,753006399	0,012766487	1953,454884
Ampasimbezo	ZUC	66464	29661,14612	0,446273864	-0,304621845	0,789565265	0,014675085	7177,97496
Ankitsika Tanandava	Noyau dur	3314	1552,900961	0,468588099	0,01101754	0,714951456	0,010294019	375,7796326
Ankitsika Tanandava	Noyau dur	430	185,0043733	0,430242729	0,15178974	0,593065739	0,004105528	44,74865833
Ankitsika Tanandava	Noyau dur	3527	1441,913339	0,408821474	-0,250428826	0,66077441	0,01263909	348,920628
Ankitsika Tanandava	Zone protégée	52540	23582,54924	0,448849433	-0,157549784	0,78074199	0,012262069	5706,954515
Ankitsika Tanandava	Zone protégée	17733	6855,501025	0,38659567	-0,401709348	0,695187211	0,019791635	1659,008848
Ankitsika Tanandava	ZUC	27124	11753,14136	0,433311509	-0,154285684	0,770066619	0,01110572	2844,237809
Ankitsika Tanandava	ZUC	12297	4691,070163	0,381480862	-0,401709348	0,695187211	0,022547322	1135,216579
Kapany	Zone protégée	49883	27141,3386	0,544099966	-0,119999982	0,856067657	0,022265252	6568,181542
Kapany	Noyau dur	14552	8127,623255	0,558522764	-0,042746115	0,856067657	0,021265378	1966,862428
Kapany	ZUC	12748	6812,502629	0,534397759	0,012709699	0,82780689	0,018526328	1648,603236
Maromandia	Zone protégée	60408	35348,13637	0,585156542	-0,258400947	0,838509321	0,021510134	8554,226602
Maromandia	Noyau dur	14685	8079,907569	0,55021502	-0,089834496	0,823144972	0,020568248	1955,315232
Maromandia	ZUC	17224	9632,76839	0,559264305	-0,231028691	0,815498114	0,023679476	2331,10755
Sijoro Tranovy	Zone protégée	51882	25961,08578	0,500387144	-0,262723535	0,842745662	0,02342749	6282,560359
Sijoro Tranovy	ZUC	10942	5508,629865	0,50343903	-0,218161717	0,83482945	0,018200041	1333,066027
Sijoro Tranovy	Noyau dur	14907	7843,525607	0,526163923	-0,181154132	0,842745662	0,031042508	1898,110797

Annexe 7 : Résultats des tests statistiques

- Etude des facteurs influençant la NDVI/Biomasse

+ Test ANOVA

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Parcelle	4	789	197.33	11797.7	<2e-16	***
categorie	2	36	18.05	1079.3	<2e-16	***
Parcelle:categorie	8	80	10.05	600.8	<2e-16	***
Residuals	326737	5465	0.02			

Signif. codes: 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

+ Test Tuckey

$categorie

	diff	lwr	upr	p adj
zone_protegee-noyaudur	0.004530053	0.003178837	0.005881269	0
zuc-noyaudur	-0.017993542	-0.019343839	-0.016643245	0
zuc-zone_protegee	-0.022523595	-0.023761071	-0.021286118	0

$`Parcelle:categorie`

	diff	lwr	upr	p adj
Ankitsika_Tanandava:noyaudur-Ampasimbezo:noyaudur	-3.742962e-02	-0.0431234667	-0.031735776	0.0000000
Kapany:noyaudur-Ampasimbezo:noyaudur	7.332602e-02	0.0689969862	0.077655044	0.0000000
Maromandia:noyaudur-Ampasimbezo:noyaudur	7.211794e-02	0.0677623681	0.076473520	0.0000000
Sijoro_Tranovy:noyaudur-Ampasimbezo:noyaudur	5.543791e-02	0.0511461984	0.059729616	0.0000000
Ampasimbezo:zone_protegee-Ampasimbezo:noyaudur	8.619891e-03	0.0054563850	0.011783396	0.0000000
Ankitsika_Tanandava:zone_protegee-Ampasimbezo:noyaudur	-3.742962e-02	-0.0431234667	-0.031735776	0.0000000
Kapany:zone_protegee-Ampasimbezo:noyaudur	6.029735e-02	0.0565607565	0.064033949	0.0000000
Maromandia:zone_protegee-Ampasimbezo:noyaudur	1.427015e-01	0.1391389012	0.146264000	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zone_protegee-Ampasimbezo:noyaudur	9.679562e-03	0.0060890716	0.013270052	0.0000000
Ampasimbezo:zuc-Ampasimbezo:noyaudur	-2.961275e-02	-0.0325570053	-0.026668500	0.0000000
Ankitsika_Tanandava:zuc-Ampasimbezo:noyaudur	-4.117084e-02	-0.0447496308	-0.037592044	0.0000000
Kapany:zuc-Ampasimbezo:noyaudur	5.498615e-02	0.0504581563	0.059514138	0.0000000
Maromandia:zuc-Ampasimbezo:noyaudur	8.749181e-02	0.0833556314	0.091627993	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zuc-Ampasimbezo:noyaudur	2.806121e-02	0.0232325792	0.032889847	0.0000000
Kapany:noyaudur-Ankitsika_Tanandava:noyaudur	1.107556e-01	0.1043719933	0.117139279	0.0000000
Maromandia:noyaudur-Ankitsika_Tanandava:noyaudur	1.095476e-01	0.1031458900	0.115949241	0.0000000
Sijoro_Tranovy:noyaudur-Ankitsika_Tanandava:noyaudur	9.286753e-02	0.0865091347	0.099225922	0.0000000
Ampasimbezo:zone_protegee-Ankitsika_Tanandava:noyaudur	4.604951e-02	0.0403910514	0.051707972	0.0000000
Ankitsika_Tanandava:zone_protegee-Ankitsika_Tanandava:noyaudur	-9.475754e-14	-0.0073776881	0.007377688	1.0000000
Kapany:zone_protegee-Ankitsika_Tanandava:noyaudur	9.772697e-02	0.0917292612	0.103724686	0.0000000
Maromandia:zone_protegee-Ankitsika_Tanandava:noyaudur	1.801311e-01	0.1742402176	0.186021926	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zone_protegee-Ankitsika_Tanandava:noyaudur	4.710918e-02	0.0412013894	0.053016977	0.0000000
Ampasimbezo:zuc-Ankitsika_Tanandava:noyaudur	7.816868e-03	0.0022780032	0.013355734	0.0001702
Ankitsika_Tanandava:zuc-Ankitsika_Tanandava:noyaudur	-3.741216e-03	-0.0096419083	0.002159476	0.7007249
Kapany:zuc-Ankitsika_Tanandava:noyaudur	9.241577e-02	0.0858955608	0.098935976	0.0000000
Maromandia:zuc-Ankitsika_Tanandava:noyaudur	1.249214e-01	0.1186669632	0.131175904	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zuc-Ankitsika_Tanandava:noyaudur	6.549083e-02	0.0587583674	0.072223301	0.0000000
Maromandia:noyaudur-Kapany:noyaudur	-1.208071e-03	-0.0064332083	0.004017067	0.9999808
Sijoro_Tranovy:noyaudur-Kapany:noyaudur	-1.788811e-02	-0.0230601271	-0.012716088	0.0000000
Ampasimbezo:zone_protegee-Kapany:noyaudur	-6.470612e-02	-0.0689885054	-0.060423743	0.0000000
Kapany:zone_protegee-Kapany:noyaudur	-1.302866e-02	-0.0177502267	-0.008307098	0.0000000
Maromandia:zone_protegee-Kapany:noyaudur	6.937544e-02	0.0647903753	0.073960496	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zone_protegee-Kapany:noyaudur	-6.364645e-02	-0.0682532568	-0.059039649	0.0000000
Ampasimbezo:zuc-Kapany:noyaudur	-1.029388e-01	-0.1070618300	-0.098815705	0.0000000
Ankitsika_Tanandava:zuc-Kapany:noyaudur	-1.144969e-01	-0.1190945455	-0.109899159	0.0000000
Kapany:zuc-Kapany:noyaudur	-1.833987e-02	-0.0237095718	-0.012970164	0.0000000
Maromandia:zuc-Kapany:noyaudur	1.416580e-02	0.0091220872	0.019209507	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zuc-Kapany:noyaudur	-4.526480e-02	-0.0508903440	-0.039639260	0.0000000
Sijoro_Tranovy:noyaudur-Maromandia:noyaudur	-1.668004e-02	-0.0218742970	-0.011485777	0.0000000
Ampasimbezo:zone_protegee-Maromandia:noyaudur	-6.349805e-02	-0.0678072693	-0.059188838	0.0000000
Ankitsika_Tanandava:zone_protegee-Maromandia:noyaudur	-1.095476e-01	-0.1159492409	-0.103145890	0.0000000
Kapany:zone_protegee-Maromandia:noyaudur	-1.182059e-02	-0.0165665080	-0.007074675	0.0000000
Maromandia:zone_protegee-Maromandia:noyaudur	7.058351e-02	0.0659733730	0.075193640	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zone_protegee-Maromandia:noyaudur	-6.243838e-02	-0.0670701415	-0.057806623	0.0000000
Ampasimbezo:zuc-Maromandia:noyaudur	-1.017307e-01	-0.1058816240	-0.097579770	0.0000000
Ankitsika_Tanandava:zuc-Maromandia:noyaudur	-1.132888e-01	-0.1179114793	-0.108666084	0.0000000
Kapany:zuc-Maromandia:noyaudur	-1.713180e-02	-0.0225229262	-0.011740668	0.0000000
Maromandia:zuc-Maromandia:noyaudur	1.537387e-02	0.0103073540	0.020440382	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zuc-Maromandia:noyaudur	-4.405673e-02	-0.0497027277	-0.038410734	0.0000000
Ampasimbezo:zone_protegee-Sijoro_Tranovy:noyaudur	-4.681802e-02	-0.0510626674	-0.042573366	0.0000000
Ankitsika_Tanandava:zone_protegee-Sijoro_Tranovy:noyaudur	-9.286753e-02	-0.0992259220	-0.086509135	0.0000000
Kapany:zone_protegee-Sijoro_Tranovy:noyaudur	4.859445e-03	0.0001720748	0.009546816	0.0333483

Maromandia:zone_protegee-Sijoro_Tranovy:noyaudur	8.726354e-02	0.0827137026	0.091813385	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zone_protegee-Sijoro_Tranovy:noyaudur	-4.575835e-02	-0.0503300970	-0.041186594	0.0000000
Ampasimbezo:zuc-Sijoro_Tranovy:noyaudur	-8.505066e-02	-0.0891345204	-0.080966799	0.0000000
Ankitsika_Tanandava:zuc-Sijoro_Tranovy:noyaudur	-9.660874e-02	-0.1011713157	-0.092046173	0.0000000
Kapany:zuc-Sijoro_Tranovy:noyaudur	-4.517600e-04	-0.0057914224	0.004887902	1.0000000
Maromandia:zuc-Sijoro_Tranovy:noyaudur	3.205391e-02	0.0270421903	0.037065620	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zuc-Sijoro_Tranovy:noyaudur	-2.737669e-02	-0.0329735680	-0.021779820	0.0000000
Ankitsika_Tanandava:zone_protegee-Ampasimbezo:zone_protegee	-4.604951e-02	-0.0517079720	-0.040391051	0.0000000
Kapany:zone_protegee-Ampasimbezo:zone_protegee	5.167746e-02	0.0479950109	0.055359913	0.0000000
Maromandia:zone_protegee-Ampasimbezo:zone_protegee	1.340816e-01	0.1305758427	0.137587278	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zone_protegee-Ampasimbezo:zone_protegee	1.059671e-03	-0.0024744363	0.004593779	0.9995684
Ampasimbezo:zuc-Ampasimbezo:zone_protegee	-3.823264e-02	-0.0411078684	-0.035357418	0.0000000
Ankitsika_Tanandava:zuc-Ampasimbezo:zone_protegee	-4.979073e-02	-0.0533129514	-0.046268504	0.0000000
Kapany:zuc-Ampasimbezo:zone_protegee	4.636626e-02	0.0418828431	0.050849670	0.0000000
Maromandia:zuc-Ampasimbezo:zone_protegee	7.887192e-02	0.0747845891	0.082959254	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zuc-Ampasimbezo:zone_protegee	1.944132e-02	0.0146544654	0.024228180	0.0000000
Kapany:zone_protegee-Ankitsika_Tanandava:zone_protegee	9.772697e-02	0.0917292612	0.103724686	0.0000000
Maromandia:zone_protegee-Ankitsika_Tanandava:zone_protegee	1.801311e-01	0.1742402176	0.186021926	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zone_protegee-Ankitsika_Tanandava:zone_protegee	4.710918e-02	0.0412013894	0.053016977	0.0000000
Ampasimbezo:zuc-Ankitsika_Tanandava:zone_protegee	7.816868e-03	0.0022780032	0.013355734	0.0001702
Ankitsika_Tanandava:zuc-Ankitsika_Tanandava:zone_protegee	-3.741216e-03	-0.0096419083	0.002159476	0.7007249
Kapany:zuc-Ankitsika_Tanandava:zone_protegee	9.241577e-02	0.0858955608	0.098935976	0.0000000
Maromandia:zuc-Ankitsika_Tanandava:zone_protegee	1.249214e-01	0.1186669632	0.131175904	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zuc-Ankitsika_Tanandava:zone_protegee	6.549083e-02	0.0587583674	0.072223301	0.0000000
Maromandia:zone_protegee-Kapany:zone_protegee	8.240410e-02	0.0783736591	0.086434537	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zone_protegee-Kapany:zone_protegee	-5.061779e-02	-0.0546729479	-0.046562633	0.0000000
Ampasimbezo:zuc-Kapany:zone_protegee	-8.991011e-02	-0.0934060033	-0.086414207	0.0000000
Ankitsika_Tanandava:zuc-Kapany:zone_protegee	-1.014682e-01	-0.1055129942	-0.097423385	0.0000000
Kapany:zuc-Kapany:zone_protegee	-5.311205e-03	-0.0102158339	-0.000406577	0.0194191
Maromandia:zuc-Kapany:zone_protegee	2.719446e-02	0.0226490585	0.031739861	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zuc-Kapany:zone_protegee	-3.223614e-02	-0.0374196117	-0.027052667	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zone_protegee-Maromandia:zone_protegee	-1.330219e-01	-0.1369172590	-0.129126519	0.0000000
Ampasimbezo:zuc-Maromandia:zone_protegee	-1.723142e-01	-0.1756234196	-0.169004987	0.0000000
Ankitsika_Tanandava:zuc-Maromandia:zone_protegee	-1.838723e-01	-0.1877568796	-0.179987696	0.0000000
Kapany:zuc-Maromandia:zone_protegee	-8.771530e-02	-0.0924886660	-0.082941941	0.0000000
Maromandia:zuc-Maromandia:zone_protegee	-5.520964e-02	-0.0596130781	-0.050806199	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zuc-Maromandia:zone_protegee	-1.146402e-01	-0.1196996836	-0.109580792	0.0000000
Ampasimbezo:zuc-Sijoro_Tranovy:zone_protegee	-3.929231e-02	-0.0426315920	-0.035953037	0.0000000
Ankitsika_Tanandava:zuc-Sijoro_Tranovy:zone_protegee	-5.085040e-02	-0.0547606310	-0.046940167	0.0000000
Kapany:zuc-Sijoro_Tranovy:zone_protegee	4.530659e-02	0.0405123334	0.050100837	0.0000000
Maromandia:zuc-Sijoro_Tranovy:zone_protegee	7.781225e-02	0.0733861751	0.082238325	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zuc-Sijoro_Tranovy:zone_protegee	1.838165e-02	0.0133024923	0.023460810	0.0000000
Ankitsika_Tanandava:zuc-Ampasimbezo:zuc	-1.155808e-02	-0.0148847819	-0.008231387	0.0000000
Kapany:zuc-Ampasimbezo:zuc	8.459890e-02	0.0802674044	0.088930395	0.0000000
Maromandia:zuc-Ampasimbezo:zuc	1.171046e-01	0.1131844701	0.121024660	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zuc-Ampasimbezo:zuc	5.767397e-02	0.0530290915	0.062318840	0.0000000
Kapany:zuc-Ankitsika_Tanandava:zuc	9.615698e-02	0.0913714861	0.100942483	0.0000000
Maromandia:zuc-Ankitsika_Tanandava:zuc	1.286626e-01	0.1242460575	0.133079241	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zuc-Ankitsika_Tanandava:zuc	6.923205e-02	0.0641611532	0.074302948	0.0000000
Maromandia:zuc-Kapany:zuc	3.250567e-02	0.0272901860	0.037721144	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zuc-Kapany:zuc	-2.692493e-02	-0.0327049803	-0.021144888	0.0000000
Sijoro_Tranovy:zuc-Maromandia:zuc	-5.943060e-02	-0.0649091231	-0.053952075	0.0000000

- Etude des facteurs profondeur sur le stock en carbone dans le sol

+ Test Tuckey

	diff	lwr	upr	p adj
II-I	-1.160841	-60.98985	58.66816	0.9999999
III-I	34.419309	-25.40970	94.24831	0.5660822
IV-I	196.195155	136.36615	256.02416	0.0000000
V-I	179.632311	119.80331	239.46132	0.0000000
VI-I	198.960535	124.38826	273.53281	0.0000000
III-II	35.580149	-24.24886	95.40915	0.5291543
IV-II	197.355996	137.52699	257.18500	0.0000000
V-II	180.793152	120.96415	240.62216	0.0000000
VI-II	200.121376	125.54910	274.69365	0.0000000
IV-III	161.775846	101.94684	221.60485	0.0000000
V-III	145.213003	85.38400	205.04201	0.0000000
VI-III	164.541226	89.96895	239.11350	0.0000000
V-IV	-16.562844	-76.39185	43.26616	0.9684126
VI-IV	2.765380	-71.80690	77.33766	0.9999981
VI-V	19.328224	-55.24405	93.90050	0.9763018

```
Call:
lm(formula = NDVI ~ Biomasse, data = corNDVI)

Residuals:
      Min        1Q    Median        3Q       Max 
-0.178267 -0.039746  0.004664  0.042470  0.199688 

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)    
(Intercept)  0.34433    0.03324  10.358 8.28e-15 ***
Biomasse     1.99892    0.27111   7.373 6.92e-10 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residual standard error: 0.06925 on 58 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4838,	Adjusted R-squared:  0.4749 
F-statistic: 54.36 on 1 and 58 DF,  p-value: 6.917e-10
```

Annexe 8 : Carottes obtenues dans le substrat