
Rapport de stage individuel

4^{ème} année

Étude de l'espacement optimal des palétuviers
dans des zones monospécifiques pour une captation
maximale du carbone

Association Vahatra
Fkt fongony-Ambalahonko, 405 Analalava,
Madagascar
Logo

Tuteur entreprise :
Anthony Bracke
Coordinateur OPH

Tuteur académique :
Séraphine Grellier

Léonie Limeuil Guibert
ADAGE
2024-2025

Remerciement

Tout d'abord un grand merci à Anthony Bracke pour toute son aide dans l'encadrement et le stage. Merci aussi pour ton engagement et l'espoir que tu donnes.

Merci à l'ensemble de l'association Vahatra pour le meilleur des accueils. Un grand merci à Elia pour les cours, les journées ensemble et la joie de vivre.

Merci à Salime pour toute son aide dans les missions et son enseignement. Merci de nous avoir sauvés de la marée et des huitres. Et merci pour tout le partage.

Merci Clara Hauffman pour la bonne humeur, l'aventure et les kokusy.

Merci à Séraphine Grellier pour l'encadrement et l'aide apportée.

Merci à toutes les personnes rencontrées pour leur sourire, leur partage et leur gentillesse.

Un grand misaotra à tous.

Sommaire

Sommaire	2
Contexte associatif.....	3
Présentation de l'étude	4
Description et contexte	4
Recherches bibliographiques	6
Récolte de données sur le terrain	13
Statistiques	18
Discussion	24
Retour sur l'expérience	24
Perspectives d'amélioration	26
Bibliographie	27
Annexe.....	30

Contexte associatif

Ce stage est réalisé au sein de l'association Vahatra dans la ville d'Analalave située dans la région de Sofia au nord-ouest de Madagascar. D'un point de vue étymologique, celle-ci signifie *racine* et forme un groupe local menant différentes actions mêlant à la fois protection de l'environnement tout en impliquant les communautés locales. Les missions générales de l'association sont liées à la conservation des écosystèmes côtiers à travers des études scientifiques, ainsi qu'en conservant un aspect de développement des communautés très important des populations malgaches.

Elia, la professeure de français permet aux bénévoles d'acquérir les bases de la langue malagasy permettant ainsi une communication limitée mais adaptée avec la population. Son travail est majoritairement tourné vers l'éducation des enfants en leur permettant une ouverture à travers l'apprentissage de la langue française.

L'association, portée sur l'environnement, aborde plusieurs thématiques en plus de la reforestation des mangroves. On y trouve une unité basée sur le suivi des lagons situés dans la zone, qui cherche à analyser ces écosystèmes afin de proposer des moyens de protection. Une unité d'agroécologie portant sur la récolte de graines sur des arbres mères afin d'alimenter une pépinière. La conversion des agriculteurs locaux vers l'agroécologie est également un objet de recherche et d'expérimentation par l'association. Enfin une dernière nouvelle unité s'est formée, tournée vers l'urbanisme et l'aménagement de la ville afin de lutter contre l'érosion des sols et le renforcement de zones d'ombres.

Vahatra accueille chaque année un nombre variable de bénévoles sur ces différents sujets. Cette période d'accueil est généralement limitée sur la période des stages de janvier à août. Ainsi, le reste de l'année est consacré à la poursuite des mesures sur le terrain par les techniciens. Le manque de financement reste un problème important pour l'association, notamment pour pouvoir fournir un salaire suffisant et constant aux membres.

Enfin l'unité mangrove est constituée du technicien Salimo à plein temps, ainsi que des bénévoles. Le principal point de recherche est la conservation et la restauration de cet écosystème fortement présent à Madagascar et dans la région. Les recherches antérieures ont permis d'identifier la reforestation des mangroves dans la zone et à plus grande échelle comme un enjeu majeur. Ainsi, l'association cherche à réaliser des recherches spécifiques dans l'optimisation de la reforestation des palétuviers.

Présentation de l'étude

Description et contexte

a. Contexte de l'étude

Les mangroves constituent un écosystème particulier à l'interface de l'océan et le continent. Ces arbres ayant la faculté de se développer sur des zones régulièrement inondées par la marée, survient à des taux de salinité très élevé et des sols anoxiques. Ces arbres halophytes représentent un enjeu important de lutte contre le réchauffement climatique à travers leur faculté de puits de carbone. En effet, les taux de carbone stocké par les mangroves dans le monde est estimé entre 738,9 et 1 023 MgC.h⁻¹ (Alongi, 2020). Les palétuviers offrent également un moyen de lutte contre l'érosion des sols et abritent un grand nombre d'espèces (Kathiresan, 2021). Toutefois, ces écosystèmes si précieux sont grandement menacés à travers les activités anthropiques comme la déforestation. Par ailleurs, certains projets de restauration et reforestation de mangroves sont menés dans le monde.

Cette étude s'inscrit en réponse du constat que la majorité de ces projets de reforestation menés par de grandes entreprises, qui sont nombreux dans la région de Madagascar et dans le monde, ne se basent pas sur des études préalables. En effet, la plupart des forêts reforestées suivent une constante de plantation de 1m entre chaque arbre. Or, les nombreux suivis sur le terrain et expériences dans les mangroves naturelles montrent qu'il n'existe pas de constance véritable d'un point de vue de l'espacement.

L'association Vahatra s'est tout d'abord impliquée dans ce sujet à travers la création d'un manuel de reboisement en 2023 afin de proposer un guide de plantation, des moyens de gestion etc. Ce guide permet d'établir un diagnostic préalable permettant de comprendre le type de sol, la salinité, les périodes d'inondations qui sont des notions de base sur la compréhension des écosystèmes de mangrove. Il a également été établi qu'une première plantation de l'espèce *Avicennia marine* comme espèce pionnière est nécessaire afin que la zone soit adaptée au développement de nouvelles espèces.

La notion d'espacement, facteur d'influence essentiel pour la croissance des palétuviers est déterminé de façon plus concrète par rapport aux forêts naturelles et définit un espacement de 2m entre chaque plants. Ce chiffre, bien que plus vraisemblable reste encore scientifiquement infondé et nécessite d'être approfondi afin que les conditions de croissance des mangroves soit optimales dans le cadre de leur fonction écosystémique. En effet, constituant de véritables puits de carbone, les mangroves sont un moyen de lutte face au réchauffement climatique très important. Les forêts plantées en suivant l'écart de 1m ont montré une tendance à évoluer en une forêt de petite taille avec des arbres de faible biomasse même après maturation. Ces contraintes de croissance influent directement sur la capacité des arbres de capter et séquestrer le carbone. Ainsi, il devient nécessaire d'approfondir les connaissances afin de déterminer si l'espacement a un lien sur la biomasse des arbres et par conséquent, leur capacité à séquestrer le carbone.

b. Acteurs impliqués

D'un point de vue des acteurs, Vahatra est en liaison avec les politiques à la fois nationales et locales. En effet, la Direction régionale du développement durable ou encore la Direction régionale de la pêche et de l'économie bleue sont des branches du ministères malgaches impliqués dans les projets. Ainsi que l'office national de l'environnement qui donne l'accréditation afin de réaliser les projets. Plus localement, l'association est amenée à intervenir au sein de la ville d'Analalava à travers des projets de reboisement des plages.

Enfin, l'association Vahatra est associée de l'entreprise Bondy internationale depuis 2023. Les deux travaillent ensemble sur un projet de reforestation terrestre à travers la collecte de graine d'arbres autochtones. Une des problématiques actuelle du reboisement repose sur la plantation quasiment systématique d'espèces exotiques envahissante comme l'Acacia par exemple. Les acteurs du reboisement tel que cette entreprise et d'autres n'ont pas les compétences ni les capacités de proposer un reboisement adapté aux écosystèmes et aux populations. Vahatra cherche donc à améliorer ces projets en cherchant à les adapter aux besoins véritables de populations tout en répondant aux enjeux de la biodiversité.

D'un point de vue du projet sur les mangroves, cette étude est réalisée à petite échelle sans association. Le but final de cette publication est à la fois d'apporter de nouvelles connaissances d'un point de vue scientifique. Et à plus grande échelle, de faire remonter les résultats et informations aux médias et politiques, ce qui permettraient de faire évoluer les législations et les méthodes mises en œuvre. Cette évolution est un enjeu primordial de la reforestation des mangroves car les grandes entreprises sont les seuls à pouvoir réellement agir, comme le montre l'entreprise Bondy qui a obtenu la gestion d'un tiers des forêts de mangrove de Madagascar.

c. Livrable

Comme évoqué précédemment, le but de ce stage est de participer à la rédaction d'une publication scientifique. Celle-ci permettrait à l'association d'obtenir un revenu et peut-être des aides financières pour la réalisation de projet futur. Elle permettrait également de compléter et valoriser le manuel de reboisement réalisé précédemment par Vahatra.

Un rapport bibliographique a tout d'abord été réalisé afin de compléter les recherches préalables réalisées par une stagiaire bénévole. Celui-ci a permis d'approfondir des notions vues dans la littérature et surtout sur le terrain. Elle permet également de poser un cadre scientifique sur les facteurs influant des mangroves et constituent le cœur de la rédaction.

La deuxième tâche abordée durant le stage est la récolte de données sur le terrain à travers différentes missions dans les mangroves. Ces mesures seront par la suite analysées à travers plusieurs tests statistiques puis intégrées à la rédaction des résultats et discussion.

Recherches bibliographiques

Les recherches sont spécialisées sur trois thématiques distinctes et permettent de comprendre pourquoi s'attarder et justifier pourquoi nous nous intéressons à certains facteurs plus que d'autres, comme l'espace.

a. Profondeur de la boue

Un des paramètres mesuré sur le terrain est également la profondeur du sol. L'idée est de déterminer si l'épaisseur du sol mou a une influence sur le développement des racines et donc de l'arbre en lui-même. L'hypothèse envisagée est que plus le sol est profond, plus les racines ont de place et permettent à l'arbre d'obtenir plus de ressources et donc d'atteindre une biomasse importante. La boue est un élément essentiel au sein des mangroves puisqu'il existe un lien fort entre les deux. C'est en effet la vase qui permet aux arbres de se maintenir et de se stabiliser, tandis que les racines des palétuviers piègent les sédiments, et ont ainsi une influence forte sur l'advection du sol (Asp et al., 2016, Matula et al., 2019).

Ici les premières difficultés sont rencontrées, déjà d'un point de vue des mots employés, on cherche à déterminer la profondeur du sol mou, c'est-à-dire jusqu'à ce qu'on ne puisse plus enfoncer de bâton. Or, il est difficile de définir véritablement à quoi on fait référence. Les mots comme « vase » ou encore « boue » sont les plus évidents mais manquent grandement de précision. Cette difficulté se retrouve également dans la littérature où la majorité de la bibliographie emploie le terme « substrat » pour traiter du sol. De la même manière, rien n'indique les limites de ce terme. Il est très difficile de connaître ce qu'entendent les chercheurs en employant ce mot qui a une définition assez vague. Impossible de savoir si nous partageons la définition et traitons donc du même sujet. Ainsi, une première incertitude repose donc sur la définition de ce paramètre.

De plus, les articles relevant de l'importance de la profondeur du sol sont peu nombreux et traitent souvent le sujet de façon peu détaillée. Une autre difficulté réside également dans le fait que les sources se contredisent. Si certaines études définissent une profondeur idéale autour de 20,11 et 84,77 cm (Matatula et al., 2019), ou encore 30 cm d'après Widayanti et Firmansyah, 2022. D'autres semblent favoriser une épaisseur beaucoup plus large de 5 m (Asp et al., 2016). Il ne semble donc pas exister de données exactes sur la profondeur optimale pour la croissance des mangroves de manières générales, on peut imaginer une classification en fonction de la proximité face à la mer.

Toutefois, dans le cadre de notre recherche, l'étude de Matula et al., 2019 a permis d'identifier une diminution progressive de la profondeur de boue plus la zone est éloignée du bord de mer. En mettant en liaison avec la zonation des espèces, on peut estimer que *Rhizophora mucronata* favorise les fortes profondeurs puisque proche du front de mer. C'est d'ailleurs ce que montre Purwanto et al., 2022 en admettant que *Rhizophora mucronata* est capable de pousser sur une large gamme de profondeur de boue, entre 55 cm et 212 cm. De la même façon, cette variation de profondeur correspond à la diminution de la profondeur de boue en fonction de la proximité avec le front de mer.

Ainsi la bibliographie existante n'évoque pas d'influence de la profondeur de la boue par rapport à la croissance de l'arbre, mais à une échelle plus grande d'un point de vue de la répartition des espèces. Cela ne permet donc pas de répondre à notre hypothèse qui nécessite l'analyse statistique des données récoltées sur le terrain.

Par ailleurs, les recherches ont permis de mettre en évidence un nouveau paramètre déterminant dans le développement des mangroves. Si la définition du substrat de croissance des mangroves reste imprécis pour la plupart des études, certaines font références à un sol composé de limon et d'argile.

b. Géomorphologie et zonation

Deux autres facteurs très influant sur le développement des palétuviers sont la géomorphologie et la zonation. Ces deux concepts sont proches et la bibliographie tend à les confondre.

1. Géomorphologie

Premièrement, lorsque l'on parle de géomorphologie, on fait référence à la disposition de la forêt de mangroves à une grande échelle. Les premiers systèmes de classification sont proposés en 1974 par Lugo et Snedaker. Ils définissent alors cinq types qui sont les forêts de frange, riveraine, overwash et naine. D'autres auteurs comme Kjerfve, 1990 ou Woodroffe, 1992 s'alignent avec cette classification. Enfin une étude plus récente du livre *Mangroves : Ecology, Biodiversity and Management* par Rastogi et al., 2021 regroupe ces types de classification et sont représentés sur la figure 1.

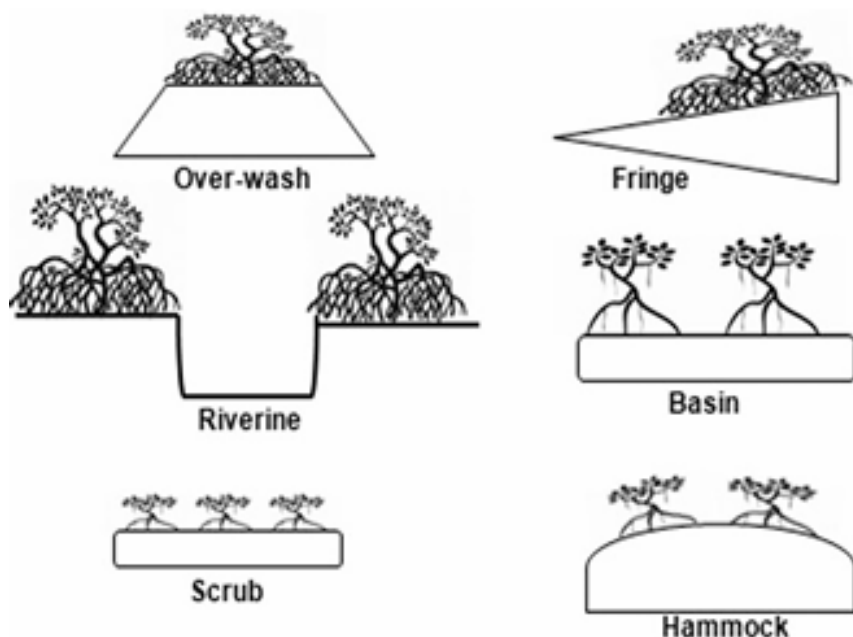


Figure 1 : Représentation schématique des six types fonctionnels des forêts de mangrove (Rastogi et al., 2021)

Les principales distinctions sont alors le système dominant comme la marée, un fleuve ou s'il n'y a peu d'apport. Les forêts overwash et frange sont directement exposées aux vagues et phénomènes de marées. Les mangroves de frange peuvent être attribuées aux forêts en bord de mer sur un continent tandis que les overwash représentent une île de mangrove entourée par la mer.

Les forêts riveraines correspondent comme leur nom l'indique au mangrove en bordure d'un fleuve où les apports d'eau douce sont donc dominant face à l'eau salée. Enfin les forêts de bassin, scrub et hammock font référence aux forêts placées à l'intérieur des terres où les apports d'eau sont plus rares. Les mangroves scrub sont des mangroves de petites tailles, et le type hamac (hammock) correspond à une mangrove de bassin dont le substrat est élevé.

Toutefois, cette classification représente des types fonctionnels et prend également en compte la zonation. En effet, les franges et bassins correspondent à la position de la forêt par rapport à l'eau ainsi ces types peuvent être attribués aux autres types à une plus petite échelle. Le concept de zonation sera abordé plus en détail dans la partie suivante.

D'autres auteurs ont également définis d'autres types fonctionnels de mangrove qui peuvent être ajoutés à cette classification. Kjerfve, 1990 présente la notion de delta et de lagon.

Les mangroves deltaïques sont des forêts situées à l'embouchure d'un fleuve, ainsi l'eau douce ainsi que l'eau de mer influencent toutes deux la mangrove (Thom, 1994). Les deltas sont considérés avec les forêts riveraines comme les plus productives en biomasse et donc en stockage de carbone. Cela s'explique en raison des apports d'eau douce et du ruissellement qui augmente le lessivage du sol diminuant ainsi la salinité et permettant un meilleur développement des arbres. Cela s'ajoute à une plus grande sédimentation des particules provenant de différentes sources acheminées par le fleuve et la marée (Augustinus, 1995). Murdiyarso et al., 2009 ajoute également que les estuaires ont souvent des sols plus profonds et des arbres de plus grande taille, ce que nous avons d'ailleurs pu confirmer sur le terrain.

Enfin, lorsque la forêt est de type côtière mais protégée de l'impact par une barrière physique on parle alors d'un lagon (Kjerfve, 1990). Ici les apports d'eau douce sont faibles voire inexistants ce qui conduit à des taux de salinité très élevés qui dépassent parfois les taux océaniques avec 70 ppt.

S'intéresser à ces différents types fonctionnels a donc une grande importance puisqu'ils permettent d'expliquer pourquoi certaines forêts sont plus aptes à stocker de grande quantité de carbone que d'autres.

Pour une meilleure compréhension de cette classification, la figure 2 ci-dessous illustre une clé de détermination permettant d'attribuer le bon type géomorphologique à la forêt étudiée.

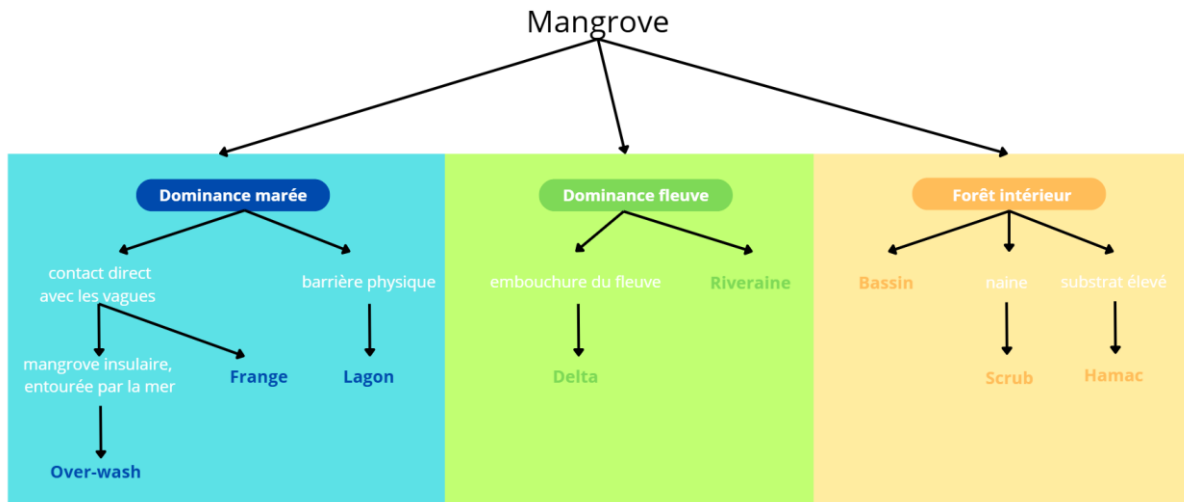


Figure 2 : Clé de détermination des huit types de forêts de mangrove (Limeuil)

2. Zonation

Enfin, le concept de zonation peut être expliqué comme une classification du type fonctionnelle de la forêt à une échelle plus petite qu'est la position intertidale, c'est-à-dire la position par rapport à la mer. Encore une fois, beaucoup d'études traitent le sujets et identifient plusieurs types qui parfois se confondent avec la géomorphologie.

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi la classification proposée par Woodroffe et al., 1988 définissent trois unité d'habitat au sein de la zone intertidal. La tidal creek correspond à la berge boueuse fortement inclinée qui s'apparente au mangrove de frange. Le tidal flat, située derrière la berge, est constituée d'une surface boueuse plate et correspond à la zone interne de la forêt (cœur). Enfin la hinterland margin qui se définit par un substrat sableux reculé par rapport aux mangroves (tanne). La figure 3 ci-dessous illustre cette classification.

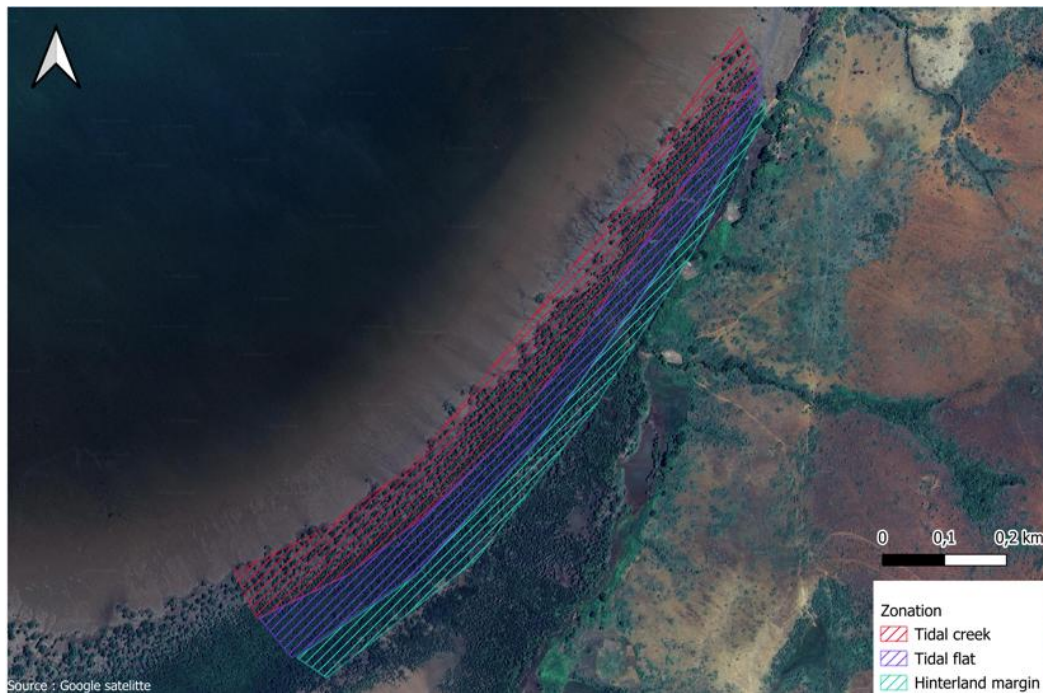


Figure 3 : Carte illustrant classification de Woodroffe, 1988 sur une mangrove de type géomorphologique frange (Limeuil)

La photographie de la figure 4 montre la zone « tidal creek » d'une forêt riveraine sur le site de Lava Paiki. On constate bien que les arbres sont à proximité direct avec l'eau, et a donc une période bien plus exposée que les zones plus intérieures. La photographie de droite quant à elle montre la tanne, située après l'hinterland margin. On remarque le taux de salinité très élevé à travers la blancheur du sel sur le sol.



Figure 4 : A droite, tidal creek de la forêt riveraine de Lava Païki. A gauche, tanne sur le site d'Ambonio. (Limeuil)

Encore une fois, déterminer la position intertidale du transect mesuré est très important car les taux de carbones ne sont pas les mêmes dans chaque zone comme nous allons le voir dans la partie suivante.

c. Séquestration du carbone de la litière

Enfin, puisque l'on s'intéresse à la capacité de stockage du carbone dans les mangroves, il a fallu comprendre quels processus étaient en jeu. Je me suis pour ma part intéressée à la production et dégradation de la litière des palétuviers. La litière correspond ainsi à l'accumulation de matière organique morte à surface du sol, distincte des éléments ligneux de plus grande taille (Brown et Lugo, 1982). Elle est produite à la suite de la mort des éléments végétaux tels que les feuilles, les brindilles ou encore les fruits. Les feuilles constitueraient la majeure partie de matière organique produite par les palétuviers (Hemminga et al., 1994). On considère en effet que 86% de la litière est constituée par la chute des feuilles et fruits (Brown et Lugo, 1982). Sukardjo et Yamada, 1992 montrent une proportion de feuilles similaire entre 73,29 et 84,30% au sein de la litière.

Cette matière constitue une quantité de carbone non négligeable puisque la production moyenne mondiale est estimée à $456\text{--}460 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ (Jennerjahn & Ittekkot, 2002 ; Kristensen et al., 2008). Chez *Rhizophora mucronata*, la production varie entre **7 et 14 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$** (Sukardjo & Yamada, 1992 ; Shunula & Whittick, 1999).

Cependant la totalité de cette production ne sera pas stocké dans le sol. En effet, 40% de la production de *Rhizophora mucronata* est perdue par la marée (Slim et al., 1996). De plus, environ 25% est reminéralisé (Jennerjahn & Ittekkot, 2002). La production dépend aussi de la géomorphologie, de la salinité, de l'apport d'eau douce et de la saisonnalité (Amarasinghe & Balasubramaniam, 1992 ; Steinke & Ward, 1990). Les forêts protégées produisent davantage de litière que celles soumises à un stress anthropique (Mall et al., 1991), d'où l'importance de relever la géomorphologie et zonation du transect.

Enfin, un autre processus rentrant en jeu dans la conservation du carbone contenu dans la litière est lié à la faune benthique, notamment les crabes. La bioturbation influence grandement le cycle du carbone (Vopel & Hancock, 2005 ; Sarker et al., 2021). Toutefois le manque d'information est important sur cette partie et il est impossible de distinguer la quantité de litière enfouie dans les terriers non consommées ou celle directement consommée, à la fois par les crabes et les bactéries contenues dans le sol encore oxygène (proche de la surface).

Ainsi, Les crabes enfouissent et consomment une part importante de la litière : 28–85 % de la production annuelle selon les études (Ashton, 2002 ; Cannicci et al., 2008 ; Booth et al., 2023). La litière stockée dans les terriers est moins exportée par la marée et bénéficie d'un enfouissement plus durable (Ashton, 2002 ; Fromard et al., 2018). Cependant, la bioturbation peut aussi favoriser la décomposition et réduire le stockage de carbone, du fait de l'oxygénation et du recyclage de la matière (Cannicci et al., 2008 ; Sarker et al., 2014).

Pour finir, il est possible de quantifier approximativement la quantité de litière qui sera enfouie dans le sol. Alongi, 2014 évoque un taux total situé entre 10 à 15%. Duarte et al., 2005 et Breithaupt

et Steinmuller, 2022 présentent un taux similaire, ce qui permet d'avoir une estimation plutôt fiable de la quantité. L'ensemble du cycle de la litière a été résumé sur la figure 5 ci-dessous afin de comprendre une partie du cycle du carbone.

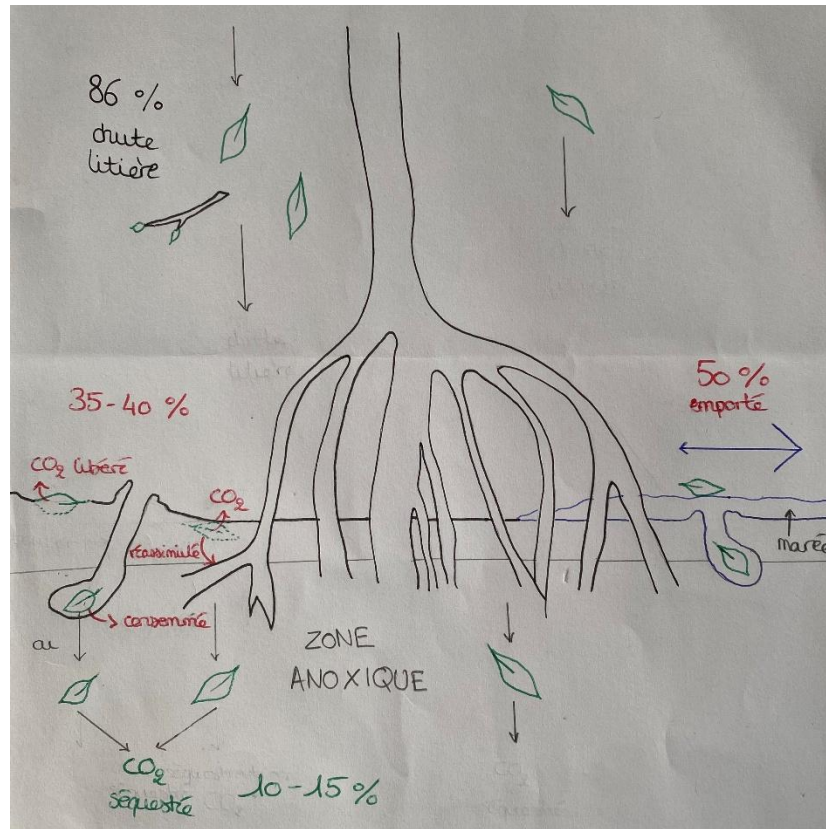


Figure 5 : Schéma simplifié du cycle de vie de la litière produite par les mangroves (Limeuil)

Récolte de données sur le terrain

Une fois la phase de recherche bibliographique terminée, la deuxième phase de ce stage se présente sous la forme de récolte de données sur le terrain.

a. PCQ method

Le protocole définit pour la récolte de données sur le terrain suit la méthode Point-Centered Quarter method (PCQ). La méthode PCQ peut être utilisée pour déterminer plusieurs paramètres comme la dominance d'une espèce, sa fréquence ou encore la densité. Dans notre cas, elle est utilisée pour identifier la distance des arbres, ainsi que leur biomasse.

Une autre possibilité aurait été de réaliser des quadrats afin de déterminer la distance des arbres sur plusieurs parcelles et d'établir une moyenne, toutefois l'accessibilité des forêts de mangrove rend la démarche compliquée et donc peu adaptée.

Les mesures sont réalisées sur des transects de 200m, déterminé au préalable par télédétection dans des zones monospécifiques de *Rhizophora mucronata*. Les transects sont réalisés sur plusieurs sites à l'échelle du districts d'Analava (annexe 1), au total 19 transects ont été réalisés. Le but étant de varier la géomorphologie des forêts ainsi les différentes zonations afin de prendre en considération toutes les possibilités envisageables. La figure 6 illustre comment la distribution des transects selon la zonation des arbres. D'un point de vue géomorphologique, la forêt d'Ambalahonko est une forêt côtière car à proximité du bord de mer. Pour la zonation intertidale, les transects 17 et 19 correspondent à la zone tidal creek, c'est-à-dire là où la marée et les vagues ont le plus d'impact. Les numéros 18 et 16 sont au cœur de la forêt et sont attribués à la zone tidal flat. Enfin, les deux derniers transects 14 et 15 sont les plus éloignés du bord de mer. Ils sont situés sur la zone hinterland margin, où la salinité est généralement plus importante et l'impact de la mer est moindre. La classification de la zone intertidale est basée sur l'étude de Woodroffe, 1988.



Figure 6 : Carte des transects 14 à 19 sur le site d'Ambalahonko (Limeuil)

Sur ces transects sont déterminés aléatoirement 12 à 15 arbres de référence. La zone autour de chaque arbre est divisée en quatre quarts égaux avec des lignes imaginaires illustrées sur la figure 7. On identifie alors l'arbre le plus proche de l'arbre de référence dans chaque zone, sur lequel on vient mesurer sa distance exacte à l'aide d'un laser ainsi que sa hauteur. Le diamètre à hauteur de poitrine (dbh) est déterminé à l'aide d'un mètre à 1,3 m de hauteur. Cette hauteur est ajustée à 30 cm au-dessus de la plus haute racine lorsque celle-ci dépasse les 1,3 m (Kauffman et Donato, 2012).

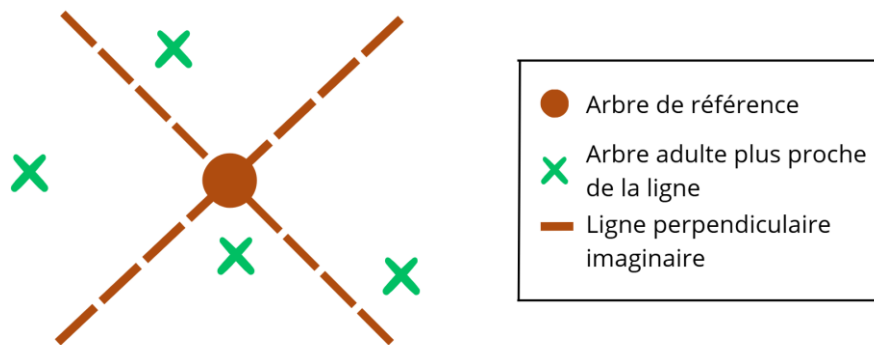


Figure 7 : Schéma explicatif de la méthode Point-Centered Quarter basé sur Mitchell, 2023 (Limeuil)

Dans le cadre de notre étude, il est nécessaire de ne s'intéresser qu'aux arbres ayant un stade de maturité avancé, ce qui s'exprime à travers un dbh supérieur à 30cm selon la définition du *mucronata* adulte (MEDD-MAEP, 2019). Cet élément constitue une certaine difficulté sur le terrain car certains sites d'études sont plus jeunes ou moins développés en raison de plusieurs facteurs environnementaux et déterminer les arbres de références devient une tâche difficile. La figure 8 permet de comparer la tailles des arbres sur deux différents transects, on peut voir que les arbres du transect 17 ont une biomasse bien inférieure au transect 19. Dans le cas où le tronc s'est divisé en plusieurs parties, le diamètre de chaque tronc est ajouté afin d'obtenir la somme totale correspondant au diamètre global de l'arbre.



Figure 8 : Photographies du transect 19 et 17 respectivement, site d'Ambalahonko (Limeuil)

Une autre difficulté rencontrée à travers l'identification des arbres et également la présence d'arbres fusionnés comme illustré sur la figure 9 ci-dessous. Les deux troncs ont un système racinaire bien défini mais leur liaison à la base montre que les deux arbres se sont liés. Ainsi, il s'est posé la question de savoir si ces arbres comptaient pour un arbre à différents troncs ou bien deux arbres distincts. N'ayant pas trouvé de réponses, il a été choisi d'éviter de considérer ce type d'arbre et de favoriser les troncs bien définis.



Figure 9 : Exemple de deux arbres ayant fusionné, site de Lava Paiki (Limeuil)

b. Analyse du sol

Pour finir, les dernières mesures sont celles du sol. La composition de celui-ci a en effet un grand impact sur les mangroves et leur développement. Ainsi, le but de l'étude est également d'apporter cette notion comme autre facteur influençant la biomasse des palétuviers. Pour cela, nous utilisons un conductimètre permettant de prendre les mesures suivantes :

Tableau 1 : Résumé des mesures récoltées avec le conductimètres

Mesures du sol	Unité
- température	- C°
- pH	
- conductivité électrique (EC)	- $\mu\text{S}/\text{cm}$
- concentration totale en solides dissous (TDS)	- ppm
- Salinité	- ppm et %/ppm
- Densité relative	- S.g.
- Potentiel redox	- mV

De plus, la texture est également relevé selon si elle est vaseuse, sablo-vaseuse ou sableuse. Cette estimation se fait au toucher.

c. Difficultés et contraintes rencontrées sur le terrain

1. Contraintes des marées

De nombreuses autres difficultés rentrent également en jeu lors que travail dans les mangroves. L'un des facteurs les plus difficiles à gérer en amont correspond aux marées. En effet, comme il a été précisé précédemment, le travail ne peut s'effectuer qu'à marée basse lorsque l'eau est totalement retirée des mangroves. Cela est nécessaire à la fois pour faciliter les déplacements et surtout pour les prélèvements d'eau en profondeur. Ainsi, le temps de travail est réduit à 4h, maximum 5h, ce qui fait que le travail doit être réalisé assez rapidement afin de ne pas être rattrapé par la marée.

Ce facteur est d'autant plus contraignant lorsque nous travaillons sur des forêts moins développées où nous mettons plus de temps à trouver des arbres matures. De plus, les systèmes racinaires constituent un obstacle important pour le déplacement ce qui engendre une perte de temps assez considérable. Certaines forêts ont également les racines recouvertes d'huîtres très coupantes qui ralentissent l'évolution de la même manière.

Par ailleurs, d'un point de vue de la contrainte des marées, une mission s'est vu compromettre en raison de la marée morte. Cela signifie que les coefficients sont très faibles, le niveau d'eau est relativement stable. Ainsi aux heures prévues de marée basse, le niveau d'eau était encore trop important pour travailler et cela a engendré de grosses difficultés d'un point de vue de l'organisation. L'ensemble des missions restantes s'est vu impacté. Il est donc très difficile d'estimer avec précision le travail dans les mangroves, et cela peut avoir des conséquences importantes sur l'ensemble de la mission.

2. Outils de mesure biaisés

Par la suite, s'est avéré une problématique du point de vue du matériel utilisé. En effet, les mesures du sol ont pour objectif de recueillir des données sur la composition de celui-ci, à travers la salinité et l'électro conductivité principalement et ont une certaine importance dans l'analyse statistique. Il s'est trouvé que le premier outil de mesure utilisé n'était pas adapté à l'environnement de Madagascar car il se base sur une température de 20°C, et ne peut pas s'adapter. Sachant que la température ambiante est la plus grande partie du temps au-dessus de 30°C, les résultats obtenus ne sont pas optimaux pour cette étude. De plus, que la marque choisie n'est pas purement scientifique et pose question d'un point de vue de la véracité.

Il a ainsi été choisi d'investir dans un nouvel appareil capable de s'adapter à la température et surtout plus correcte d'un point de vue scientifique. Toutefois, nous nous sommes rendu compte à travers un grand nombre de mesures que les résultats étaient les mêmes à chaque arbre, quelle que soit la zone ou le lieu. Il s'agit du fait que les taux de salinité des mangroves dépassent les seuils que l'appareil peut mesurer. Ainsi de la même manière que pour le premier appareil, les données récoltées ne sont pas véritablement utilisables car identiques et n'apportent rien au calcul statistique.

Finalement en comparant les deux modèles, il s'est trouvé en plus que les résultats différaient de façon très importante ce qui était également problématique. Il est ainsi impossible de continuer la récolte de

donnée avec un nouvel appareil dont les mesures sont trop différentes. La mission ayant pour principal objectif de déterminer l'influence de l'espacement, les analyses du sol ne sont pas primordiales à cette étude ainsi elles ne seront pas prises en compte lors de l'analyse des données.

3. Travail en équipe et mode de vie

Enfin, une des dernières difficulté à été de l'ordre de la communication dans le travail d'équipe. En effet, notre technicien mangrove Salime est tombé malade durant le travail. N'ayant pas osé communiquer sincèrement sur son état de santé véritable, il a voulu continuer le travail. Toutefois, son état ainsi que la tâche d'enfoncer les bars de fer dans le sol pour mesurer la profondeur du sol a conduit à le rendre encore plus faible. L'efficacité du travail s'est ainsi vu diminuer mais surtout son état de santé. Cela m'a donc fait comprendre l'importance de la communication et du travail d'équipe pour se soutenir et ainsi assurer un travail dans les meilleures conditions pour tous.

De plus, le mode de vie malgache repose essentiellement sur une organisation au dernier moment. Ainsi les heures de départ ne sont pas toujours connu jusqu'à la veille de mission ce qui peut engendrer un certain stress. De plus, certains transects sont réalisés dans des zones où il est nécessaire de se rendre en pirogue de sorte que le travail dépend entièrement de la ponctualité et la présence du piroguier. Il est important de préciser que cette différence de mode de vie est plutôt marquante car quand nous avons tendance à vouloir se fixer des horaires précis etc., il est compliqué de satisfaire cette exigence ici. Il est très difficile voire impossible de partir à l'heure prévue ce qui implique une certaine adaptation de notre part. Cette particularité ne s'arrête pas au monde du travail, l'ensemble de la vie est basée dessus, que ce soit les rendez-vous professionnels jusqu'aux moyens de transports.

Statistiques

Après avoir récolté les données sur le terrain, vient leur analyse à travers différents tests statistiques. Comme vu précédemment, pour répondre à la question de l'espacement optimal des palétuviers, plusieurs paramètres sont étudiés. La réponse requiert donc la réalisation de tests poussés et multiparamétriques pour lesquels je n'ai pas connaissance. Mon analyse statistique s'est donc basée sur une réorganisation des données ainsi que sur la réalisation de graphiques simples qui permettent d'apporter un premier regard sur la question.

a. Distribution des distances

L'une des principales raisons pour laquelle l'étude est menée est de savoir si la replantation effectuée par les entreprises de reforestation à 1 m d'intervalle est efficace. J'ai donc tout d'abord voulu analyser les distances rencontrées dans les forêts naturelles. Pour cela, les transects ont été regroupés dans un box plot dans la figure 10 permettant de voir si l'ensemble des distances mesurées pour chaque.

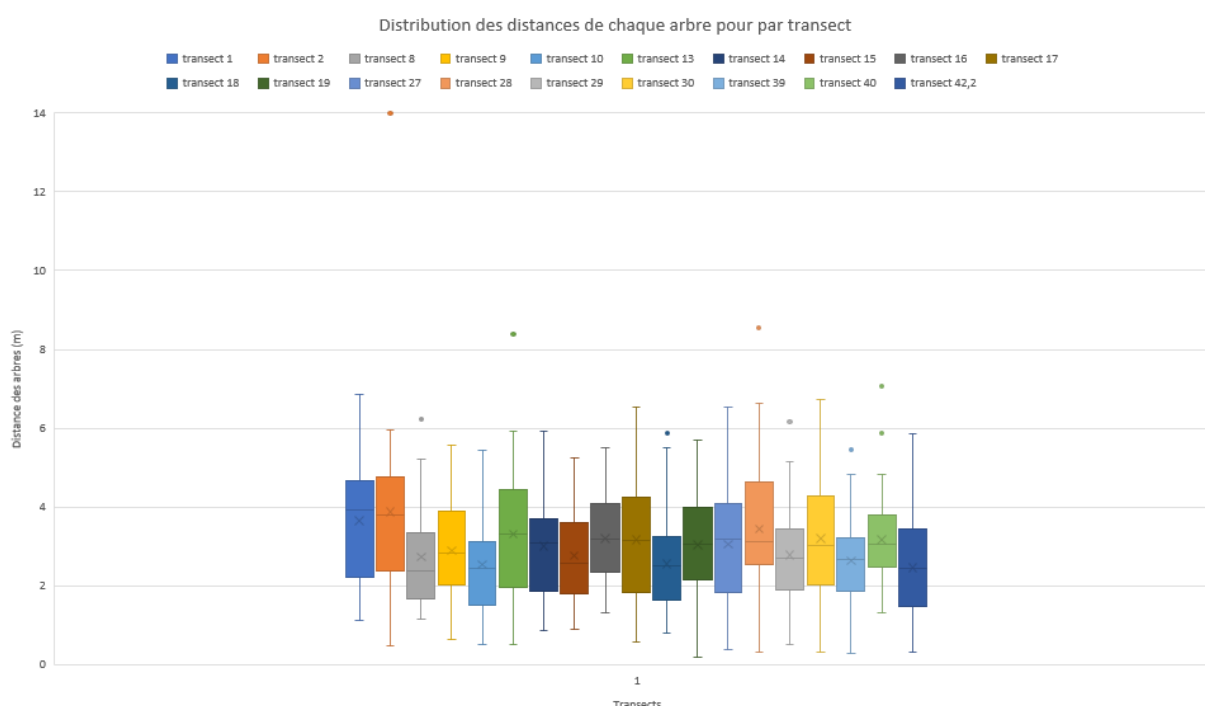


Figure 10 : Distribution des distances de chaque arbre par transect (Limeuil)

On constate alors rapidement une grande hétérogénéité pour chaque transect. Certains montrent une grande densité à travers de plus petites boîtes comme les transects 38 et 40 par exemple. Tandis que d'autres ont des valeurs beaucoup plus grandes suggérant des forêts moins denses comme le transect 2 qui montre en plus une valeur extrême à 14m.

Cela rejoint la difficulté évoquée précédemment dans l'identification d'arbres adultes. Certains sites d'études sont denses mais constitués de jeunes arbres ce qui fait que nous sommes obligé de prendre des arbres adultes à plus grande distance.

Les boxplots permettent aussi de voir que la distance d'un mètre est peu souvent rencontrée dans les transects. J'ai voulu confirmer cette hypothèse en cherchant la distribution des distances de l'ensemble des 19 transects. Pour cela, j'ai réalisé un histogramme sur la figure 11 des classes de distance rencontrées sur le terrain. On constate alors que les distances qui reviennent le plus sont à partir de 1,5m jusqu'à 3,5m. Seulement 113 arbres ont une distance inférieure à 1,5m ce qui représente 0,13% de l'ensemble des arbres analysés. Si l'on prend en dessous d'un mètre, la proportion descend à 0,3%, ce qui est encore plus faible.

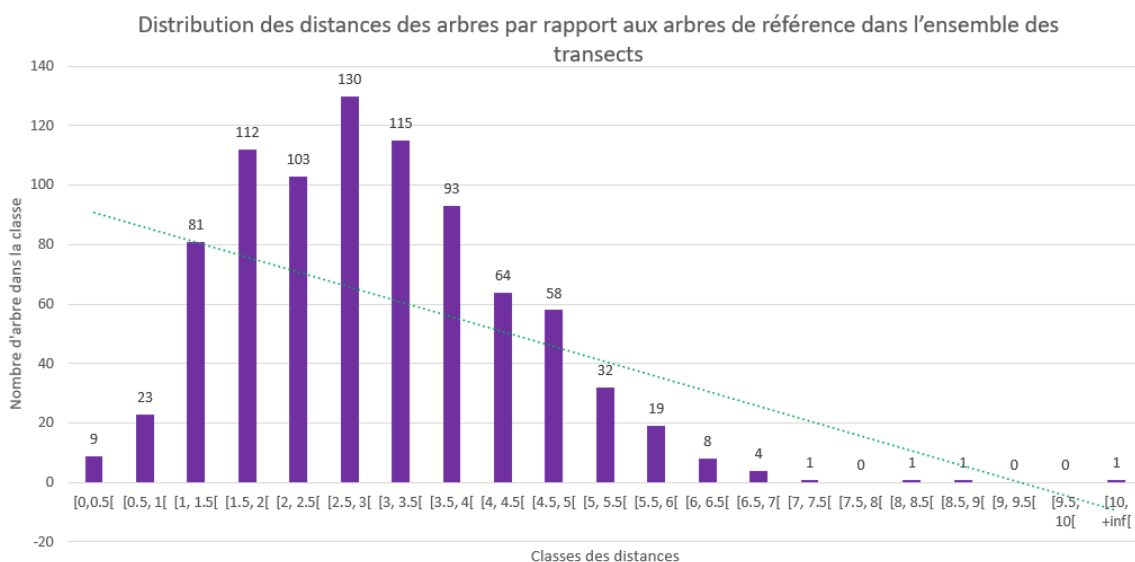


Figure 11 : Distribution des distances de chaque arbre par rapport à l'arbre de référence dans l'ensemble des transects (Limeuil)

La première réponse envisagée est alors de dire que la plantation à 1m d'intervalle n'est pas efficace puisque quasiment pas trouvable dans les forêts naturelles. Seulement il faut prendre en considération le fait que seul les arbres matures sont pris en compte dans nos mesures, alors que la densité d'arbres en comprenant les plus jeunes et les pousses est encore plus importante en réalité. Cette densité bien plus importante permet aux individus de se protéger contre les contraintes extérieures, et une densité plus faible lors de plantation pourraient causer des dégâts sur les jeunes arbres.

b. Lien entre distance et carbone stocké

Ensuite, afin de voir s'il existe un lien entre la distance et la quantité de carbone stocké dans l'arbre, il faut tout d'abord déterminer la biomasse de chaque arbre afin de connaître la quantité de carbone qu'ils contiennent. Pour cela, on se base sur des équations allométriques. Plusieurs équations permettent d'estimer la biomasse des arbres sans réaliser de mesures sur le terrain trop destructives et compliqué à réaliser. Sachant que ces équations permettent de donner des approximations, il est nécessaire de choisir la plus adaptée à l'espèce étudiée.

J'ai choisi pour ce travail l'équation allométrique déterminée par Jones et al., 2015. Le système racinaire des palétuviers étant très important et développé, on considère deux types de biomasse, la biomasse aérienne (AGB) correspondant à la biomasse de l'arbre se trouvant à la surface. Elle fait référence aux branches, troncs, feuilles et racines dans notre cas. Puis la biomasse souterraine (BGB) comprenant le système racinaire et la litière, soit la matière morte.

Les équations de Jones sont donc les suivantes :

Tableau 2 : Equations allométriques de la biomasse aérienne et souterraine estimée par Jones

AGB	
Feuilles	$B = 0,139 \times D^{2.1072}$
Racines	$B = 0.0068 \times dbh^{3.1353}$
Tiges	$B = 0.0311 \times (dbh^2 \times H)^{1.00741} \times \rho$
BGB	
	$B = 0.199 \times \rho^{0.899} \times dbh^{2.22}$

D correspond au diamètre à la base du tronc, ceci n'étant pas un paramètre relevé sur le terrain, il n'est pas pris en compte dans le résultat final. Le dbh évoqué précédemment est le diamètre à hauteur de poitrine, soit mesuré autour de 1,30. Pour utiliser cette donnée, il est important de diviser les valeurs par pi au préalable. H est la hauteur de l'arbre et enfin ρ correspond à la densité du bois spécifique à l'espèce. Jones définit la densité de *Rhizophora mucronata* à $\rho = 0.867$.

Ainsi, les valeurs sont réorganisées de façon à obtenir la biomasse totale de chaque arbre afin de la convertir en quantité de carbone. Un grand nombre d'étude s'aligne sur le fait de définir un ratio de 0,5 environ de carbone stocké par rapport à la biomasse (Wicaksono et al., 2015). La biomasse de chaque arbre est donc divisé par deux donnant la quantité de carbone en kg.C. Enfin, cette quantité est alignée avec la distance de l'arbre respectif par rapport à l'arbre de référence.

Pour définir s'il existe un lien entre la quantité de carbone et la distance, un graphique en nuage de point est réalisée dans la figure 12 ci-dessous afin de déterminer la tendance entre ces deux facteurs.

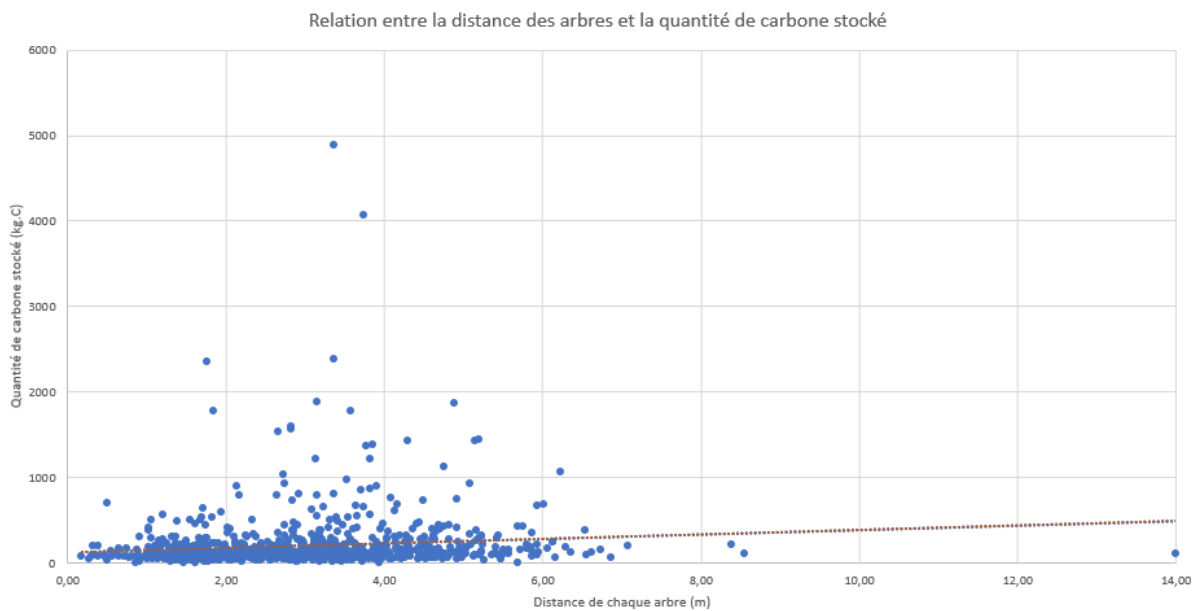


Figure 12 : Relation entre la distance de chaque arbre avec l'arbre de référence par rapport à la quantité de carbone estimée (Limeuil)

On constate tout d'abord que la majorité des arbres se trouve à une distance entre 0 et 4 m, démontrant la densité élevée présente dans les écosystèmes des mangroves.

Ensuite, la quantité de carbone est réparti de façon plutôt hétérogène. On constate en effet que sur une distance assez similaire comme autour de 3.5m par exemple, on peut trouver des arbres avec une très faible quantité de carbone, et d'autres bien plus élevées. De plus, les arbres aux distances les plus élevées n'expriment pas une quantité plus importante de carbone et restent avec une quantité de carbone assez faible. A 14m de distance, la quantité de carbone est estimée à 101,5 kg.C, soit proche de la moyenne située à 187,5 kg.C.

Enfin, la courbe de tendance est quasiment plate, indiquant qu'il n'existe pas de lien de proportionnalité entre la distance et la quantité de carbone des arbres. Pour cela, plusieurs hypothèses peuvent être évoquées, les arbres ayant besoin de ne pas être trop éloignés afin de s'aider mutuellement face aux menaces extérieures comme les vagues, le stockage des nutriments etc. Et inversement, trop proches la compétition interspécifique rentre en jeu. Cela rejoint l'hypothèse évoquée lors de la répartition des distances.

L'objet de l'étude est toutefois de déterminer la distance optimale pour laquelle la quantité de carbone est maximale. A l'aide du tableau 3 croisé dynamique, on obtient la somme de carbone contenue dans chaque classe de distance. La classe contenant les arbres situés entre 3 et 4 m de l'arbre de référence est celle qui contient le plus de carbone avec en tout 56102,5 kg C. C'est donc la classe de distance dans laquelle les arbres développent au mieux leur biomasse et sont capables de stocker le plus de carbone.

Tableau 3 : Somme de la quantité de carbone (en kg C) de chaque classe de distance (en mètre)

Classes des distance ▾	Somme de CARBONE
0,00	3548,59
1,00	29736,12
2,00	39510,92
3,00	56102,51
4,00	27114,49
5,00	12367,46
6,00	3548,30
7,00	201,72
8,00	309,67
14,00	101,58
Total général	172541,35

Pour autant, il est important de prendre en compte que les zones d'études dans lesquelles ont été pris les mesures diffèrent de manière assez importante ce qui influence les résultats. En effet, selon la géomorphologie, la zonation et d'autres critères, les apports en nutriments et facteurs extérieures ne sont pas les mêmes et impliquent un développement différents pour chaque forêt. Des tests multiparamétriques nécessitent donc d'être fait afin de formuler une réponse plus appropriée et précise sur la question de l'espacement des palétuviers qui ne peut pas être répondu à travers de simples tests comme ceux-ci. N'ayant pas les connaissances en la matière, il n'a pas été possible de réaliser ceux-ci et j'ai dû me baser sur les graphiques plus simples afin d'établir un premier constat.

c. Géomorphologie et zonation

Enfin, il est important de s'intéresser au critère de la géomorphologie et de la zonation. Nous avons vu précédemment comment ces paramètres influencent en théorie le développement des mangroves. Comparer la quantité de carbone moyenne des arbres selon la géomorphologie de la forêt puis par la suite selon leur localisation dans la forêt semble intéressant.

Comme tous les transects n'ont pas le même nombre d'arbres, il est nécessaire d'utiliser la moyenne pondérée afin d'obtenir la quantité moyenne de carbone pour chaque arbre selon le type de morphologie.

Trois types de géomorphologie sont présents dans nos transects. On trouve des mangroves fluviales, côtière et de lagons. En comparant les moyennes de carbone stocké sur le tableau 4 ci-dessous, on constate que les forêts de lagons ont en moyenne plus de carbone stocké tandis que les mangroves fluviales ont le plus faible taux. Cela rentre en contradiction avec les résultats bibliographiques et observations sur le terrain qui ont montré que les mangroves fluviales sont bien plus denses et plus développées que les autres types.

Cela peut être expliqué par le fait que les transects ne sont pas équilibrés dans le sens où seuls trois transects étaient de type fluvial contre deux côtiers et quatorze de type lagons.

Tableau 4 : Moyenne pondérée de la quantité de carbone contenue dans chaque arbre selon la géomorphologie (kg C)

Type	Moyenne pondérée (kg C)
Fluviale	287,5
Lagon	396,6
Côtière	395,7

De la même manière, si l'on veut étudier la variable de la zonation on effectue également la moyenne pondérée. On observe alors sur le tableau 5 que sur l'ensemble de nos transects, la position intertidale qui contient en moyenne le plus de carbone par arbre est l'hinterland margin, soit la zone la plus reculée par rapport au niveau de la mer. Pas très loin vient la tidal creek qui correspond à la zone la plus exposée aux vagues et à la marée et en dernière position la tidal flat.

Encore une fois, ces résultats ne mettent pas en évidence selon si le transect a lieu dans une forêt plutôt côtière ou fluviale, ce qui influence énormément le développement des arbres. Il faut donc encore une fois ne pas les considérer comme réponse finale de l'étude.

Tableau 5 : Moyenne pondérée de la quantité de carbone contenue dans chaque arbre selon la position dans la zone intertidale (kg C)

Zone	Moyenne pondérée (kg C)
Tidal creek	423,606774
Tidal flat	331,7068313
Hinterland margin	447,269222

Pour conclure sur ces analyses statistiques, celles-ci permettent d'établir un premier constat rapide et peu précis des forêts de mangroves. Ce premier regard nous permet de voir que l'espacement est un facteur complexe et il est difficile d'affirmer s'il existe réellement une distance optimale. Cette variable dépend de plusieurs autres enjeux qu'il est difficile de déterminer avec de tels tests statistiques. Toutefois, la géomorphologie/zonation ou encore l'analyses du sol semblent être des paramètres dont l'influence paraît plus importante sur la biomasse de l'arbre.

Discussion

Retour sur l'expérience

a. Cadre de vie

Ce stage, réalisé dans un pays étranger, s'inscrit également dans la découverte d'une toute nouvelle culture. Madagascar a en effet un mode de vie tout à fait différent du nôtre, ce qui nécessite une période d'adaptation mais surtout un nouvel apprentissage. En effet, ce peuple vit véritablement au fil des saisons, d'un point de vue de la nourriture selon la période sèche ou humide. Lorsque les revenus dépendent de la pêche, la puissance des vents comme le Vahatras rendent la mer trop dangereuse pour la pêche sur la pirogue. Une grande majorité de foyers manquent également d'électricité ou d'accès à l'eau.

Au sein de la ville, la vie s'organise au rythme du soleil se couchant autour de 17h30. Si l'électricité est présente la majorité de la journée, de nombreux délestages ou autres événements rendent les coupures fréquentes et parfois de longues durées. A cela s'ajoute un réseau wifi pas toujours optimal qui rend le travail compliqué à certains moments.

b. Condition de travail

Sur le terrain, le contact avec la population est au plus proche pourtant la barrière de la langue constitue une frontière très importante. Le français étant très limité dans les zones les plus reculées. Toutefois, il est toujours possible d'interagir et de se comprendre à travers un autre type de communication. Une majorité des personnes rencontrées furent d'une très grande générosité et très heureuses de nous partager leur savoir.

Le travail dans les mangroves est par ailleurs très éprouvant. Ce milieu hostile à l'homme rend la prise de mesures très compliquée. En effet, il est souvent nécessaire de se déplacer sur les racines en hauteur, la boue complique fortement le déplacement. De plus on peut trouver des huitres recouvrant les racines qui induisent de nombreuses coupures. Le temps constitue également une contrainte importante puisque pour effectuer les mesures du sol il est nécessaire de récolter l'eau contenue dans le sol, et non celle de la marée. Ainsi le travail doit être réalisé à marée basse, déterminant une période variable entre 4 à 5h de travail. Il faut donc s'adapter aux horaires de marées, amenant parfois à se lever très tôt. Les mangroves ne sont pas toujours situées à proximité du campement, ce qui nécessite un déplacement parfois important avant et après les mesures. La récolte de données est donc une étape assez physique de la recherche. Elle conduit toutefois à la découverte de nouveaux paysages déconcertants pour la plupart, ainsi qu'à la découverte d'une toute nouvelle biodiversité.

c. Perspective professionnelle

Enfin d'un point de vue professionnel, ce stage constitue un premier pas vers le métier de la recherche. A travers la phase de recherche bibliographique, j'ai pu apprendre à lire une revue scientifique de la façon la plus optimale. J'ai également travaillé à la manière d'organiser ma bibliographie ainsi que de rédiger selon les codes des publications scientifiques. De plus les nombreuses missions en extérieur m'ont permis de découvrir les prises de mesure sur le terrain qui sont tout aussi enrichissantes. Enfin si la détermination du protocole ainsi que l'analyse des données n'auront pas été réalisées durant ce stage, cela m'a tout de même permis d'avoir un aperçu du métier de chercheur vers lequel je souhaiterai par la suite m'orienter. Ainsi, je souhaiterai poursuivre mon futur stage de cinquième année dans le milieu de la recherche.

Pour autant, le travail en association est pour le peu compliqué. Il est très enrichissant de pouvoir aider bénévolement une population qui n'a pas les connaissances ni les moyens de protéger son environnement. Toutefois, le matériel ainsi que les différentes actions qui pourraient être réalisées sont souvent bloqués pour des raisons budgétaires ou réalisées sans véritable matériel adapté. Cela est un peu frustrant et dommage car tout le monde souhaiterait faire plus.

Perspectives d'amélioration

Enfin, comme les premiers résultats statistiques l'ont vaguement montré, l'espacement ne semble pas être le facteur le plus déterminant pour une captation du CO₂ plus optimale. des études futures portant sur une analyse du sol plus poussée permettront peut-être de mettre en évidence des résultats plus significatifs qui définiront clairement comment replanter de façon plus efficace les mangroves.

Une possibilité serait déjà de réaliser des tests du bocal, souvent étudiés en pédologie. Cela consiste à prélever des échantillons de sol, ici dans les mangroves et de les faire décanter dans un bocal en verre qu'on complète d'eau. La proportion à respecter est de deux tiers d'eau. Comme le sol des mangroves est très riche en matière organique et sédiments rapportés par la marée et la litière, il est nécessaire de prélever dans une zone assez en profondeur.

Les différents composants du, soient le sable, le limon et l'argile se déposent ainsi sur différents horizons qu'on mesure avec une règle. Les données sont reportés sur un triangle des textures qui nous indique ainsi la proportion de tel ou tel composant. La composition du sol est une caractéristique très importante pour les mangroves comme l'a montré l'étude bibliographique qui évoque que leur développement est peu adapté à un sol sableux, surtout pour le genre *mucronata*.

Cet échantillonnage pourrait donc être réalisé facilement sur les transects et ne demande pas beaucoup de matériel ni de temps. Le sol prélevé dans des sachets peut être mis en bocal au retour des missions.

Par ailleurs, tous les transects ne correspondent pas aux différentes position intertidales sur tous les sites d'études. Il serait donc préférable de respecter ce critère afin d'avoir le même nombre de données pour le critère de la zonation comme facteur d'influence sur le développement des mangroves.

Enfin, si l'on veut comprendre l'impact de l'espacement sur les forêts replantées, il pourrait être envisagé de faire des mesures sur d'anciennes zones reboisées justement. L'intérêt serait de travailler sur plusieurs zones où les arbres n'ont pas été plantés à la même intervalle. La comparaison des mesures indiquerait quel espacement a conduit à la forêt capturant le plus de carbone et inversement. Cela amènerait toutefois à des contraintes physiques comme les zones reboisées ne sont pas situées à proximité, mais reste une perspective d'étude future possible.

Bibliographie

- Alongi, D. M., 2014. Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, 6, 195–219.
- Alongi D., 2018. Blue Carbon : Coastal Sequestration for Climate Change Mitigation
- Amarasinghe, M.D. et Balasubramaniam, S., 1992. Net primary productivity of two mangrove forest stands on the northwest coast of Sri Lanka. *Hydrobiologia* 247, 37–47.
- Ashton E.C., 2002. Mangrove sesarmid crab feeding experiments in Peninsular Malaysia. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 273, 97 – 119
- Asp N. E., Gomes V.J.C., Ogston A., Borges J.C.C., Nittrouer C.A., 2016. Sediment source, turbidity maximum, and implications for mud exchange between channel and mangroves in an Amazonian estuary. *Ocean Dynamics*, 66, 285–297
- Augustinus P., 1995. Geomorphology and sedimentology of mangroves. *Geomorphology and sedimentology of estuaries. Developments in sedimentology* 53. Pp 333-358
- Booth J.M., Fusi M., Marasco R., Daffonchio D., 2023. The microbial landscape in bioturbated mangrove sediment: A resource for promoting nature-based solutions for mangroves. *Microbial Biotechnology*, 16, 1584–1602.
- Breithaupt J.L. et Steinmuller H.E., 2022. Refining the Global Estimate of Mangrove Carbon Burial Rates Using Sedimentary and Geomorphic Settings. *Geophysical Research Letters*
- Brown S. et Lugo A.E., 1982. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica* 14:161–187
- Cannicci S., Burrows D., Fratini S., Smith III T.J., Offenberg J., Dahdouh-Ghebas F., 2008. Faunal impact on vegetation structure and ecosystem function in mangrove forests: A review. *Aquatic Botany* 89, 186–200
- Duarte C.M., Middelburg J.J., Caraco N., 2005. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences*, 2, 1–8
- Fromard F., Michaud E., Hossaert-McKey M., 2018. Mangrove : une forêt dans la mer. CNRS, Recherche midi
- Kathiresan K., 2021. Mangroves: Types and Importance dans Mangroves: Ecology, Biodiversity and Management
- Kauffman J.B., et Donato D.C., 2012. Protocols for the Measurement, Monitoring and Reporting of Structure, Biomass and Carbon Stocks in Mangrove Forests. Working Paper 86. CIFOR, Bogor, Indonesia.
- Hemminga M. A., Slim F.J., Kazungu J., Ganssen G.M., Nieuwenhuize J., Kruij N.M., 1994. Carbon outwelling from a mangrove forest with adjacent seagrass beds and coral reefs (Gazi Bay, Kenya). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* Vol 106, 291-301
- Jennerjahn T.C. et Ittekkot V., 2002. Relevance of mangroves for the production and deposition of organic matter along tropical continental margins. *Naturwissenschaften* 89:23–30

- Jones T., Haridify R.R., Ravaoarinorotsihoarana, Lalao R., et SciProfilesScilitPreprints.orgGoogle Scholar. 2015. The Dynamics, Ecological Variability and Estimated Carbon Stocks of Mangroves in Mahajamba Bay, Madagascar.
- Kjerfve B., 1990. Manual for investigation of hydrological processes in mangrove ecosystems.
- Kristensen, E., Bouillon, S., Dittmar, T., Marchand, C., 2008. Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review. *Aquat. Bot.* 89, 201–219.
- Lugo A.E. et Snedaker S.C., 1974. The ecology of mangroves. *Annual review of ecological systems*, vol 5, 39-64
- Mall, L.P., Singh, V.P., Garge, A., 1991. Study of biomass, litter fall, litter decomposition and soil respiration in monogeneric mangrove and mixed mangrove forests of Andaman Islands. *Trop. Ecol.* 32, 144– 152.
- Matatula J, Poedjirahajoe E, Pudyatmoko S, Sadono R., 2019. Spatial distribution of salinity, mud thickness and slope along mangrove ecosystem of the coast of Kupang District, East Nusa Tenggara, Indonesia. *Biodiversitas* 20, 1624-1632.
- Ministère de l'Environnement et du Développement Durable and Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche. 2019. *Etat Des Lieux Des Mangroves de Madagascar*. Antananarivo, Madagascar.
- Murdiyarso, D., D. Donato, J. B. Kauffman, S. Kurnianto, M. Stidham, and M. Kanninen. 2009. Carbon Storage in Mangrove and Peatland Ecosystem: A Preliminary Account from Plots in Indonesia. Working Paper. Bogor: Center for International Forestry Research.
- Purwanto RH, Mulyana B, Satria RA, Yasin EHE, Putra ISR, Putra AD. 2022. Spatial distribution of mangrove vegetation species, salinity, and mud thickness in mangrove forest in Pangarengan, Cirebon, Indonesia. *Biodiversitas* 23: 1383-1391.
- Rastogi R.P., Phulwaria M., Gupta D.K., 2021. *Mangroves: Ecology, Biodiversity and Management*. Research in Environment Division Ministry of Environment, Forest and Climate Change New Delhi, India. Springer, 1, 3-5.
- Sarker S., Masud-UI-Alam Md., Hossain M.S., Chowdhury S.R., Sharifuzzaman SM., 2021. A review of bioturbation and sediment organic geochemistry in mangroves. *Geological Journal*, 56, 2439–2450
- Shunula J.P. et Whittick A., 1999. Aspects of Litter Production in Mangroves from Unguja Island, Zanzibar, Tanzania. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49, 51-54
- Slim, F.J., Gwada, P.M., Kodjo, M., Hemminga, M.A., 1996. Biomass and litterfall of *Ceriops tagal* and *Rhizophora mucronata* in the mangrove forest of Gazi Bay, Kenya. *Mar. Freshwater Res.* 47, 999–1007.
- Steinke, T. D. et Ward, C., 1990. Litter production by mangroves II. Wavecrest Transkei South Africa, with predictions for other Transkei estuaries. *South African Journal of Botany* 56, 514-519.
- Sukardjo, S., Yamada, I., 1992. Biomass and productivity of a *Rhizophora mucronata* Lamarck plantation in Tritih, Central Java, Indonesia. *Forest Ecol. Manage.* 49, 195–209.
- Vopel K. et Hancock N., 2005. More than just a crab hole. *Water & Atmosphere*, 13, 18–19

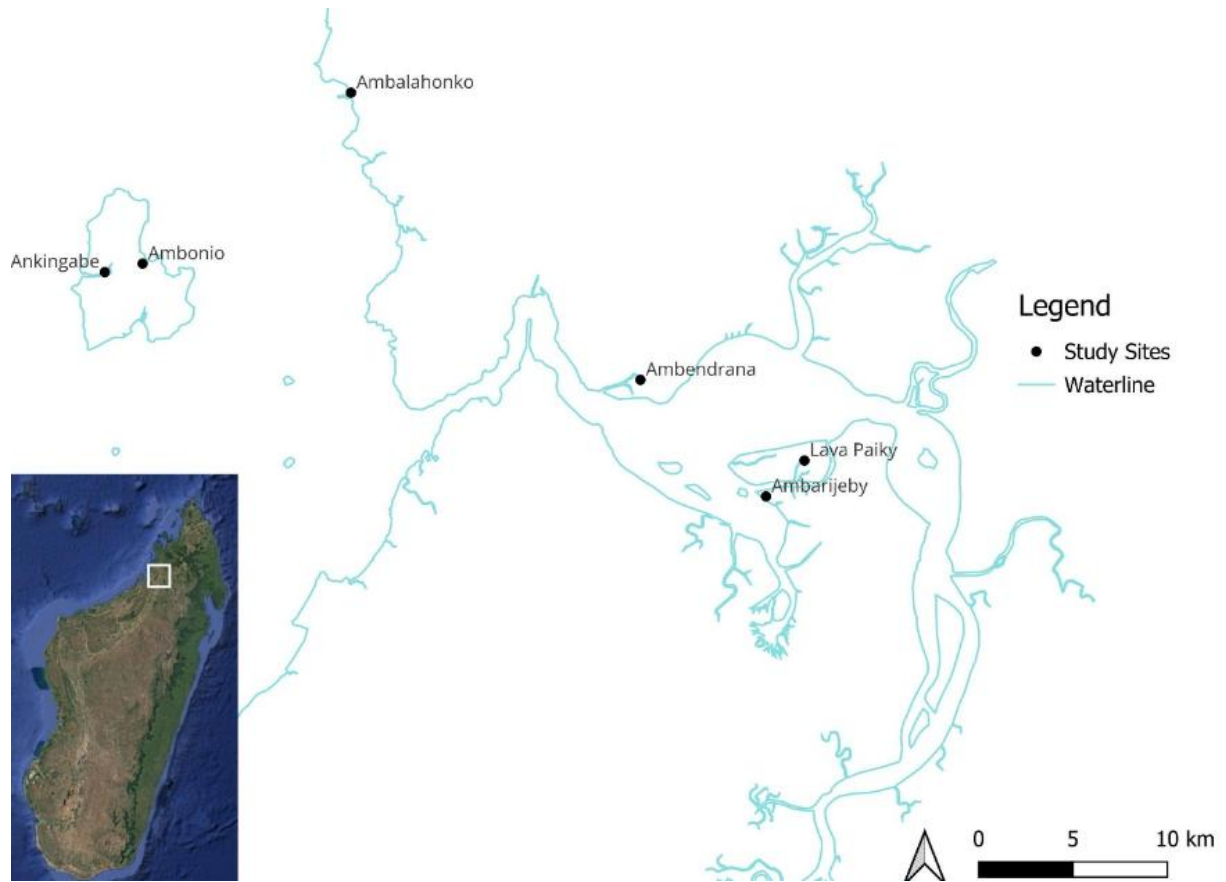
Wicaksono P., Danoedoro P., Hartono, Nehren U., 2015. Mangrove biomass carbon stock mapping of the Karimunjawa Islands using multispectral remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 37:1, 26-52

Widayanti E., Firmansyah T., 2022. Growth Rate of *Rhizophora Mucronata* Seedlings in Coastal Areas of Central Java. *Research Horizon*, Vol.2, no.1, 302-312

Woodroffe, C. D., Bardsley, K N., Ward, P. I., Hanley, I R., 1988. Production of mangrove litter in a macrotidal embayment, Darwin Harbour, N.T., Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 26, 581-598.

Woodroffe C., 1992. Mangrove sediments and geomorphology. *Tropical Mangrove Ecosystems. Coastal and Estuarine Studies*, Vol 41

Annexe



Annexe 1 : Carte des différents sites d'étude dans le district d'Analava (C. Hauffman)

Table des matières

Sommaire	2
Contexte associatif.....	2
Présentation de l'étude.....	4
Description et contexte	4
a. Contexte de l'étude	4
b. Acteurs impliqués.....	5
c. Livrable.....	5
Recherches bibliographiques	6
a. Profondeur de la boue	6
b. Géomorphologie et zonation	7
c. Séquestration du carbone de la litière.....	11
Récolte de données sur le terrain	13
a. PCQ method.....	13
b. Analyse du sol.....	15
c. Difficultés et contraintes rencontrées sur le terrain	16
Statistiques	18
a. Distribution des distances.....	18
b. Lien entre distance et carbone stocké.....	20
c. Géomorphologie et zonation	22
Discussion	24
Retour sur l'expérience	24
a. Cadre de vie.....	24
b. Condition de travail.....	24
c. Perspective professionnelle.....	25
Perspectives d'amélioration	26
Bibliographie	27
Annexe.....	30



POLYTECH
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Léonie Limeuil Guibert
2024-2025

Étude de l'espacement optimal des palétuviers dans des zones monospécifiques pour une captation maximale du carbone

Résumé : Ce stage s'inscrit dans une étude scientifique sur l'espacement des palétuviers en zone monospécifique de *Rhizophora mucronata*. L'enjeu est de comprendre comment l'espacement des arbres influence leur développement et indirectement la quantité de carbone qu'ils seront capables de stocker. Le stage a été réalisé avec une première phase de recherche bibliographique, puis la récolte des données sur le terrain ainsi qu'une analyse statistique simple.

Abstract : This internship is part of a scientific study on the spacing of mangroves in monospecific areas of *Rhizophora mucronata*. The objective is to understand how tree spacing influences their development and, indirectly, the amount of carbon they are able to store. The internship consisted of an initial phase of bibliographic research, followed by field data collection and a simple statistical analysis.

Mots Clés : Mangroves, *Rhizophora mucronata*, carbone, biomasse, espacement, séquestration

Association Vahatra :
Fkt fongony-Ambalahonko, 405 Analalava, Madagascar

Tuteur entreprise :
Anthony Bracke
Coordinateur OPH

Tuteur académique :
Séraphine Grellier