



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES



Mémoire en vue de l'obtention du Diplôme de Licence en Sciences Agronomiques
et Environnementales
Option Foresterie et Environnement

Promotion HINTSI MANANJINA
(2016 – 2021)

**QUANTIFICATION DE LA BIOMASSE
AERIENNE ET EVALUATION DU STOCK DE
CARBONE PAR LA METHODE DE
REGRESSION ALLOMETRIQUE : CAS DE LA
*FORET HAUTE LITTORALE DE TAMPOLO***

Présenté par RARIVOSON Ny Toky Jonathan

Soutenu le 04 avril 2019

Devant le jury composé de :

Président : Docteur RANJATSON Jean Patrick
Rapporteur : Docteur RABEFARIHY Andriantsoa Tahiry
Examineur : Docteur RAJEMISON Andraina Hajamanalina



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES



Mémoire en vue de l'obtention du Diplôme de Licence en Sciences Agronomiques
et Environnementales

Option Foresterie et Environnement

Promotion HINTSI MANANJINA
(2016 – 2021)

**QUANTIFICATION DE LA BIOMASSE
AERIENNE ET EVALUATION DU STOCK DE
CARBONE PAR LA METHODE DE REGRESSION
ALLOMETRIQUE : *CAS DE LA FORET HAUTE
LITTORALE DE TAMPOLO***

Présenté par RARIVOSON Ny Toky Jonathan

Soutenu le 04 avril 2019

Devant le jury composé de :

Président : Docteur RANJATSON Patrick

Rapporteur : Docteur RABEFARIHY Andriantsoa Tahiry

Examineur : Docteur RAJEMISON Andraina Hajamanalina

REMERCIEMENTS

A travers le temps de préparation de ce mémoire, j'ai pu acquérir de nouvelles connaissances et développer mes compétences. Ainsi, j'aimerais rendre gloire à Dieu qui m'a donné la force de franchir toutes les épreuves durant ce travail.

C'est avec un grand plaisir aussi que je remercie les personnes qui m'ont aidé de près et de loin dans la réalisation effective de ce travail, notamment :

- ✚ **Professeur RAMAMONJISOA Bruno Salomon**, Directeur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques.
- ✚ **Docteur HDR RABEMANANJARA Zo Hasina**, Responsable de la Mention Foresterie et Environnement.
- ✚ **Docteur RANDRIAMAHOLISOA Charles Oyverné**, Responsable de la mention Sciences Agronomiques et environnementales.
- ✚ **Docteur RANJATSON Jean Patrick**, Enseignant-chercheur à l'ESSA-Forêts, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire ; je lui exprime ma profonde gratitude.
- ✚ **Docteur RABEFARIHY Andriantsoa Tahiry**, Enseignant-chercheur à l'ESSA-Forêts, pour ses conseils précieux, ses suggestions, son riche encadrement et sa patience, qu'il trouve ici ma respectueuse admiration.
- ✚ **Docteur RAJEMISON Andraina Hajamanalina**, Enseignant-chercheur à l'ESSA-Forêts, qui malgré ses lourdes occupations a accepté d'examiner ce travail.

Je ne manquerai pas de remercier également :

- ✚ **Madame RANDRIANJAFINIMARO Mandatiana**, qui n'a pas ménagé ses efforts pour nous encadrer lors de nos descentes sur terrain.
- ✚ **Madame RANOROSOA Marie Claudine**, coordonnatrice du Site de l'ESSA-Forêts à Tampolo et son équipe, pour leur chaleureux accueil.
- ✚ **Monsieur EKINDRAZANA Dolin**, chef du Site de Tampolo et **tous les responsables techniques du projet Coketes**, qui ont consacré beaucoup de temps pour le bon déroulement de la descente sur terrain.
- ✚ **Monsieur Fredo**, guide dans la forêt de Tampolo, qui m'a accompagné et m'a beaucoup aidé lors des travaux d'inventaire.

Je ne saurais terminer sans remercier profondément :

- ✚ **La Promotion HINTSI MANANJINA**, pour m'avoir supporté et aidé durant les trois années que nous avons passées ensemble à l'ESSA.
- ✚ **Ma très chère mère, ma tante Hanta, ma tante Voahangy, ma famille, Ny Avo et mes amis** pour leur contribution, de quelque forme qu'elle soit, au soutien de mes études.

Que Dieu vous bénisse !

Jonathan.

RESUME

Le rôle de la forêt dans l'atténuation du réchauffement climatique en tant que grand puit de Carbone et réservoir de biomasse justifie l'importance de l'étude de ces stocks dans la forêt haute littorale de Tampolo. L'écosystème forestier à basse altitude typique de ce site piège une quantité significative de carbone et constitue une meilleure opportunité dans le concept de la transition énergétique en termes d'énergie de la biomasse ainsi que sur le marché carbone. De ce fait, des estimations de la biomasse aérienne et du stock de carbone aérien ont été faites en se servant d'une équation allométrique à 3 variables et conçue spécialement par VIELLEDENT et *al.*, 2012 pour Madagascar. A travers cette recherche, il a été ressorti que les espèces à grandes caractéristiques dendrométriques et dominantes participent énormément aux stockages de biomasse et de carbone. De même les arbres supérieurs à 8 mètres de hauteur constituant les strates intermédiaire et supérieure en fournissent considérablement. En effet la forêt haute littorale de Tampolo s'avère être un grand réservoir comptant en totalité jusqu'à 110,10 Mg/Ha de biomasse aérienne d'où 55,05 MgC/Ha de carbone. Malgré l'utilisation d'une seule approche dans la quantification, cette étude constitue un grand support dans le cadre de l'intégration de la Nouvelle Aire Protégée de Tampolo dans différents projets d'atténuation du changement climatique tel que le REDD+ et les projets en bioénergie de biomasse.

Mots clés : biomasse aérienne, carbone, équation allométrique, forêt haute littorale, Tampolo Madagascar

ABSTRACT

The role of forests in mitigating global warming as a major carbon sink and biomass reservoir justifies the importance of studying these stocks in the Tampolo high coastal forest. The low-lying forest ecosystem typical of this site traps a huge amount of carbon and provides a better opportunity in the concept of energy transition in terms of biomass energy as well as in the carbon market. As a result, estimates of aerial biomass and aerial carbon stock were made using a 3-variable allometric equation designed specifically by VIELLEDENT *et al.*, 2012 for Madagascar. Through this research, it was found that species with high dendrometry and dominant characteristics participate enormously in biomass and carbon storage. Similarly, trees above 8 meters in height constituting the intermediate and upper strata provide considerable supply. Indeed, the Tampolo high coastal forest is a large reservoir with a total above-ground biomass of up to 110,10 Mg/Ha, resulting in 55,05 MgC/Ha of carbon. Despite the use of a single approach in quantification, this study is a major support for the integration of the New Tampolo Protected Area into various climate change mitigation projects such as REDD+ and biomass bioenergy projects.

Keywords: above-ground biomass, allometric equation, carbon, high coastal forest, Tampolo Madagascar

FAMINTINANA

Ny ala dia isan'ny mandray anjara lehibe amin'ny fanalefahana ny vokadratsin'ny fiovaovan'ny toetr'andro amin'ny maha mpitahiry karbôna sy biômasy azy. Izany indrindra no manamarina ny maha manan-danja izao asa fikarohana izao ho an'ny ala voaaro amorondranomasin'ny Tampolo. Io karazana ala ambany haambo io dia voasokajy ho mpitahiry karbôna ambony indrindra raha mitaha amin'ny ala hafa. Noho izany izy dia manome tombon-dahiny lehibe ny firenena eo amin'ny tsenan'ny karbôna eran-tany sy ny fiovana ho an'ny amin'ny fampiasana angovo madio sy azo havaozina toy ny angovo azo avy amin'ny biômasy. Araka izany dia natao ny faminavinana ny habetsahan'ny biômasy ambonin'ny tany sy ny taharin'ny karbôna tany amin'ny toerana voalaza etsy ambony. Ny fomba mivilivily tamin'ny fampiasana fampimirana alaometirika mitondra ova telo izay noforonin'i VIELLEDENT *et al.*, 2012 voatokana manokana ho an'i Madagasikaran no nampiasaina tamin'izany. Ny vokam-pikarohana dia namoaka fa ireo karazan-kazo be hadiry, be savaivo, manana hakitroka rehefa maina ambony ary maro an'isa indrindra no manana tahirim-biomasy sy karbôna betsaka indrindra. Toy izany koa, ny fitambaran-kazo mirefy mihoatra ny valo metatra mandrafitra ny fizaran-kadiry anelanelana sy ambony indrindra dia sokajiana ho fitahirizana lehibe. Azo tsoahina tao amin'ny valim-pikarohana ary fa ny ala amorondranomasina ambon'ny Tampolo izany dia mitahiry biômasy hatrany amin'ny 110,10t/Ha ary ahitana karbôna 55,05 Mg/Ha. Ambara araka izany fa na dia fomba iray ihany aza no nampiasaina tamin'ny faminavianana sy fandanjana dia azo lazaina fa manana ny anjara toerany lehibe ny ala voaaron'ny Tampolo manoloana ireo tetik'asa maro entina hanalefahana ny fiantraikan'ny vokadratsin'ny fiovaovan'ny toetr'andro. Isan'ny lehibe amin'ireo ny fandaharan'asa ireo ny REDD+ sy ny fampiasana angovo azo havaozina azo avy amin'ny biômasy.

Teny iditra : ala amoron-dranomasina, biômasy ambonin'ny tany, fampimirana alaometirika, karbôna, Tampolo Madagasikara

LISTES DES ACRONYMES

AGB	: Aboveground Biomass
C	: Carbone
CE	: Coefficient d'élancement
CM	: Coefficient de mélange
CO₂	: Dioxyde de Carbone
DHP	: Diamètre à Hauteur de Poitrine
ESSA	: Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
ESSA-Forêts	: Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques – Mention Foresterie et Environnement
FAO	: Food and Agricultural Organization of the United Nations
GERP	: Groupe d'Etude et de Recherche sur les Primates de Madagascar
GIEC	: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
H	: Hauteur
IPPC	: International Plant Protection Convention
LIDAR	: LIght Detection And Ranging
MFFP Québec	: Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec
NAP	: Nouvelle Aire Protégée
REDD+	: Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation
RN	: Route Nationale
USDA	: United States Departement Of Agriculture
USDOE	: United States Departement Of Energy

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
RESUME	ii
ABSTRACT	iii
FAMINTINANA	iv
LISTES DES ACRONYMES	v
TABLE DES MATIERES	vi
LISTE DES EQUATIONS	viii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	viii
1. INTRODUCTION	1
2. METHODOLOGIE	2
2.1. Problématique	2
2.2. Questions de recherche et hypothèses :.....	3
2.3. Etat de connaissances.....	3
2.3.1. Notions générales.....	3
2.3.2. Présentation de la zone d'étude.....	4
2.4. Méthodes de collectes de données : inventaire floristique	11
2.5. Méthodes d'analyse des données	13
2.5.1. Analyse structurale du peuplement	13
2.5.2. Estimation de la biomasse aérienne et le stock de carbone.....	15
2.5.3. Outil d'analyse des données :.....	17
2.6. Cadre opératoire :.....	18
2.7. Résumé méthodologique :.....	19
3. RESULTATS ET INTERPRETATIONS	20
3.1. Structure floristique du peuplement.....	20
3.1.1. Composition floristique du peuplement	20
3.1.2. Diversité floristique du peuplement	21
3.2. Structure spatiale du peuplement	21
3.2.1. Analyse horizontale	21

3.2.2.	Analyse verticale	22
3.3.	Structure totale du peuplement	22
3.4.	Biomasse aérienne	23
3.4.1.	Biomasse aérienne par espèce	23
3.4.2.	Biomasse aérienne par strate	24
3.5.	Stock de Carbone de la forêt haute littorale.....	25
3.5.1.	Stock de Carbone par espèce et par strate.....	25
3.5.2.	Stocks totaux de Carbone de la forêt haute littorale de Tampolo :	26
4.	DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS	27
4.1.	Discussions	27
4.1.1.	Sur l'approche méthodologique	27
4.1.2.	Sur les résultats	28
4.1.3.	Sur les hypothèses.....	30
4.2.	Recommandations	31
4.2.1.	Sur l'approche méthodologique	31
4.2.2.	Recommandations pour les gestionnaires et la population autour de la NAP.....	32
5.	CONCLUSION	33
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	34
	LISTE DES ANNEXES.....	I
	ANNEXES.....	II
	Annexe 1 : Liste floristique des espèces ligneuses inventoriées et leurs infra-densités respectifs....	II
	Annexe 2 : Fiche d'inventaire	V
	Annexe 3 : Données climatiques de Fénérive-Est (Moyenne annuelle 2001 – 2015)	VI
	Annexe 4 : Composition floristique du peuplement	VII
1.	Composition en espèces.....	VII
2.	Composition en familles.....	IX
	Annexe 5 : Représentation en photos de la forêt haute littorale de Tampolo	X

LISTE DES EQUATIONS

Équation 1 : Formule de calcul du $D_{1,30m}$ à partir du $C_{1,30m}$	13
Équation 2 : Formule de calcul du coefficient de mélange	13
Équation 3 : Formule de calcul de la surface terrière.....	14
Équation 4 : Formule de calcul du volume	14
Équation 5 : Formule de calcul du coefficient d'élancement	15
Équation 6 : Equation de base de la régression linéaire	15
Équation 7 : Equation de régression pour la biomasse aérienne	16
Équation 8 : Conversion de la densité à 12% de l'arbre en infra-densité	16
Équation 9 : Relation stock de carbone et biomasse aérienne.....	17

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de la NAP Tampolo.....	5
Figure 2 : Diagramme ombrothermique de Fenoarivo Antsinana (2001 - 2015)	6
Figure 3 : Schéma de la topographie et du relief de la forêt de Tampolo	7
Figure 4 : Profil idéalisé de la forêt littorale de Tampolo	9
Figure 5 : Délimitation de la forêt haute de Tampolo et emplacement des unités d'inventaire	10
Figure 6 : Structure de l'unité d'échantillonnage.....	12
Figure 7 : Démarche méthodologique	19
Figure 8 : Structure des hauteurs du peuplement	22
Figure 9 : Structure totale du peuplement de la forêt haute de Tampolo	23
Figure 10 : Répartition des biomasses aérienne par strate (Mg/Ha)	25
Figure 11 : Proportion de Stocks totaux de Carbone en MgC/Ha.....	26

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques générales et définition de la station de Fenoarivo Antsinana et ses environs	7
Tableau 2 : Types de sols sous la forêt de Tampolo en fonction de la position de la nappe phréatique	8
Tableau 3 : Seuls d'inventaires et paramètres relevés sur terrain.....	12
Tableau 4 : Cadre opératoire pour les hypothèses	18
Tableau 5 : Liste floristique des espèces les plus abondantes	20
Tableau 6 : Liste des familles les plus abondantes	20
Tableau 7 : Paramètres d'appréciation de la structure spatiale du peuplement	21
Tableau 8 : Biomasse aérienne par espèces en Mg/Ha.....	24
Tableau 9 : Biomasse aérienne de chaque strate en Mg/Ha.....	25
Tableau 10 : Distribution du stock de carbone par strate en Mg/Ha.....	26
Tableau 11 : Biomasses et Stocks de Carbone totaux de la forêt haute	26
Tableau 12 : Quantité de Carbone de biomasse de quelques forêts humides de Madagascar.....	29
Tableau 13 : Stocks de carbone des forêts des différentes régions dans le monde	30

1. INTRODUCTION

La forêt est un milieu essentiellement dynamique dont les multiples composantes sont en perpétuelle évolution. La composition ainsi que la structure du peuplement forestier changent au gré des perturbations naturelles, de divers modes de succession végétale et des interventions humaines, (MFFP QUEBEC, 2016). Les forêts tropicales humides est l'une des écosystèmes les plus extrêmement complexes avec une grande diversité spécifique au monde (BERNARD, 1995). Cette grande diversité couvre jusqu'à 7% des terres émergées et abrite la moitié des tiers des plantes et animaux du globe (RAVEN, 1988). Ces forêts constituent donc une source de nourritures, de matériaux de construction, de remèdes et de combustibles pour plus d'un milliard de personne. De plus, elles font parties des réservoirs de carbone les plus importants de la planète et jouent un rôle principal contre le réchauffement climatique¹.

De ce fait, la quantification des stocks de biomasse et de carbone dans les forêts tropicales humides s'avère une priorité internationale dans le cadre de la mise en œuvre du mécanisme de La Réduction des Emissions de gaz à effet de serre dues à la Déforestation et la Dégradation des forêts pour mieux développer le « marché du carbone ». La connaissance des stocks de carbone de chaque fragment forestier de Madagascar est donc indispensable ; principalement pour la forêt littorale de Tampolo car d'un côté, cette forêt sur sol sableux est l'un des rares vestiges à Madagascar suite à une dégradation allant jusqu'à la perte de superficies de plus en plus grandes malgré leur diversité hors du commun et leur rôle dans le contexte actuel de la réduction des gaz à effet de serre (ALTIERI et PENGUE, 2006) et d'un autre côté, le site ne dispose pas encore de documents récents à ce propos. Dans l'écosystème forestier, plus de 3/4 du carbone est stocké dans la biomasse vivante souterraine et aérienne, le bois mort, la matière organique du sol et la litière (GIEC, 2003). A la suite d'un inventaire forestier, la biomasse des essences ligneuses constitue l'objet principal de cette étude par l'intermédiaire d'une équation allométrique qui met en relation plusieurs caractéristiques de taille d'un arbre.

Comme étant la minime empreinte d'un rideau forestier continu d'environ 1600 km tout au long de la côte Est de Madagascar (DE GOUVERNAIN et SILANDER, 2004) ; (GREEN et SUSSMAN, 1990), la forêt littorale de Tampolo reste un patrimoine des forêt Malagasy. L'objectif de cette étude est alors d'évaluer la quantité de la biomasse aérienne de la population ligneuse de la forêt haute de Tampolo pour avoir un aperçu de sa capacité de stockage en carbone et de fournir aux gestionnaires du site un document de base lors d'une éventuelle adhésion de la NAP dans le mécanisme REDD+.

Pour mener à bien cette présente étude, elle comprend les parties suivantes : d'abord la méthodologie dans laquelle les problématiques, les hypothèses, les états de connaissances et les méthodes de travail sont décrits, après les résultats avec leurs interprétations, la discussion avec les recommandations et enfin la conclusion générale de l'étude.

¹ <http://www.banquemondiales.org/fr/news/feature/2016/03/18/why-forests-are-key-to-climate-water-health-and-livelihoods>, consulté le 13 février 2019

2. METHODOLOGIE

2.1. Problématique

La quantification des stocks de biomasses contenus dans les forêts tropicales est primordiale au niveau international pour évaluer la capacité de stockage de carbone dans le cadre de la mise en place des mécanisme REDD+ (GRACE et *al.*, 2016). Au niveau de l'ensemble de la forêt orientale de Madagascar, la quantité de biomasse varie en fonction de l'altitude. Les valeurs de cette biomasse diminuent avec l'altitude : 99,4 tC/ha dans les forêts de 1 200m à 1 400m d'altitude contre 308,58 à 209,37 tC/ha dans une forêt littorale de 10m d'altitude (RAKOTONDRA SOA, 2009). Mais la quantité actuelle des biomasses végétales de la forêt littorale proprement dite de Tampolo est indéterminée. Cette absence de données réduit l'opportunité de la forêt littorale de Tampolo à acquérir rapidement les mécanismes REDD+.

De plus, les besoins en énergie c'est-à-dire l'utilisation de bois de chauffe, de charbon et aussi les bioénergies s'accroissent avec l'explosion démographique donc, le potentiel d'exploitabilité des forêts nécessite la quantification de la biomasse forestière pour une gestion stratégique et durable des ressources forestières au niveau national et régional. L'engouement existant autour du domaine des bioénergies et son rapide développement dans le monde par la volonté de plusieurs pays de réduire leur dépendance aux combustibles fossiles et de diminuer les émissions de gaz à effet de serre aussi demande la quantification exacte des biomasses forestières pour l'évaluation des faisabilités de ces projets. Ainsi, selon le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) en 2008, la part de la biomasse dans la production mondiale d'énergie primaire (n'ayant subi aucune transformation) en énergie primaire s'élève jusqu'à 10,02%. Et l'Agence Internationale de l'Energie évoque que l'énergie de la biomasse est la filière d'énergie renouvelable qui évolue le plus à l'horizon 2030. Et elle-même pourrait fournir 30% de l'énergie consommée dans le monde d'ici 2050.

Il est donc très important d'estimer le potentiel en biomasse végétales de cette forêt littorale pour avoir une idée préalable de son importance actuelle dans le cadre du stockage de carbone, dans le cadre de son exploitation durable par la population locale et aussi pour sa potentialité en bioénergie. Il est à vérifier aussi que pareillement à tout type de couverture forestier, cette forêt littorale produit indéniablement une quantité non négligeable de biomasse. Il est ainsi question de bâtir la réflexion autour la question suivante : **« quel est l'état des lieux de la biomasse aérienne ligneuse de la forêt haute littorale de la Nouvelle Aire Protégée de Tampolo ? »**

2.2. Questions de recherche et hypothèses :

Question de recherche

Suite à la problématique précédente, la question de recherche suivante est émise pour bien mener l'étude : Qu'est-ce qui caractérise la quantité de la biomasse aérienne des espèces ligneuses au niveau de la forêt haute littorale de Tampolo ?

Objectifs

Les objectifs de ce travail sont donc : d'identifier les espèces ligneuses qui génèrent la plus grande quantité de biomasse aérienne dans la forêt haute littorale de Tampolo, de déterminer la strate qui renferme la plus grande quantité de biomasse aérienne dans cette forêt et de déduire le stock de carbone aérien contenu actuellement dans ladite forêt littorale.

Hypothèses

Ainsi, les deux hypothèses ci-après sont émises et sont à vérifier tout au long de cette étude :

- *1^{ère} hypothèse* : La quantité de biomasse aérienne de la forêt haute littorale de Tampolo varie selon les espèces.
- *2^{ème} hypothèse* : La quantité de la biomasse aérienne de la forêt haute littorale de Tampolo ainsi que son stock de carbone diffèrent selon les strates.

2.3. Etat de connaissances

2.3.1. Notions générales

Biomasse

Généralement, la biomasse c'est l'ensemble de la matière organique contenu dans tout être vivant. Les végétaux possèdent une biomasse par l'intermédiaire de la photosynthèse durant laquelle, elles utilisent l'énergie solaire afin la convertir le dioxyde de carbone et l'eau en glucose et en oxygène. De ce fait, la biomasse se définit par un stockage d'énergie, une ressource énergétique renouvelable et durable (USDOE et USDA, 2005). Les principales composantes du stock de carbone d'une forêt tropicale sont la biomasse aérienne, le bois mort, la litière, la matière organique du sol et les racines. La biomasse aérienne, qui est la composante majeure du stock de carbone, est également l'élément le plus affecté lors de la dégradation (GIBBS et al., 2007).

Biomasse aérienne

La biomasse aérienne est l'ensemble de toute biomasse vivante au-dessus du sol, y compris les tiges, les souches, les branches, l'écorce, les graines et le feuillage (WILLIAMS, 2009). Elle est appelée

également *Aboveground Biomass* ou AGB, la biomasse se trouvant dans les parties aériennes des plantes annuelles et vivaces. Elle peut être associée aux plantes herbacées annuelles vivaces et est relativement éphémère. Elle se décompose et se régénère annuellement ou sur quelques années (IPCC, 2007).

Utilités de la biomasse des arbres

- La biomasse joue un rôle central dans le phénomène de piégeage de carbone qui tient une place très importante dans le contexte du changement climatique. Le terme « emprisonnement ou séquestration du carbone », désigne les processus extrayant le carbone ou le CO₂ de l'atmosphère terrestre ou de l'eau et le stockant dans un puits de carbone. C'est un processus important dans le cycle du carbone. En fait, l'arbre par l'intermédiaire de sa biomasse est le principal puits de carbone. Il entre en jeu dans la séquestration de carbone, peut stocker 80% du carbone de l'atmosphère dans ses feuilles, les tiges, les systèmes racinaires et, surtout, dans le tissu ligneux des tiges principales des arbres. En général, l'absorption du carbone atmosphérique varie suivant le stade de développement de l'arbre et les types d'essences. La croissance et l'absorption de carbone atteignent leur sommet dans les classes d'âge de 0 à 5 et 6 à 10 ans. Les essences pionnières croissent rapidement mais n'absorbent généralement que peu de carbone, le relèguent facilement et vite. Par contre, les bois durs et denses en contiennent beaucoup plus, et pour plus longtemps, mais ils croissent bien plus lentement (SMITH, 2004).
- En outre, la biomasse des arbres peut être utilisée en tant que source d'énergie, générateur d'électricité, producteur de carburant biologique et producteur de matière de synthèse biologique (exemple : matières adhésives, solvants, plastiques, encres et lubrifiants) (USDOE et USDA, 2005). Autrement dit, la biomasse des arbres constitue la base de la bioénergie, des biocarburants et d'autres bioproduits qui permettraient de réduire la forte dépendance à l'égard des combustibles fossiles. Son utilisation entre donc au cœur d'une bioéconomie mondiale en plein essor (MORISSETTE, 2014).

2.3.2. Présentation de la zone d'étude

Cadre administratif et situation géographique

La nouvelle aire protégée de Tampolo se situe dans la Région d'Analanjirifo, commune rurale d'Ampasina Manigory sur le littoral Est de Madagascar. Elle se trouve au Nord de Toamasina à environ 10 km de la Ville de Fenoarivo Antsinana qui est également son district. Elle occupe une superficie de 675 hectares (RAZAFINDRAMANGA, 1990) et s'étend sur 5 Km de long et 2 Km de large (RARIVOSON, 1989) entre le littoral et la Route Nationale N°5 (reliant Toamasina et Maroantsetra). Elle est limitée au Nord par le lac Tampolo, à l'Ouest par l'ancien tracé de la RN5 menant vers Rantolava, au Sud par la rivière d'Antetezambe qui se déverse vers la mer, et à l'Est par l'Océan

Indien. Ses coordonnées géographiques sont de 49°25' longitude Est et 17°17' latitude Sud, à une altitude comprise entre 5 et 10 m sur mer (RATSIRARSON *et al.*, 2001).



Figure 1 : Localisation de la NAP Tampolo

Source : RATSIRARSON *et al.*, 2001

Climat

Le climat est l'un des facteurs les plus importantes dans l'écologie à cause de son influence permanent sur les physionomies et les comportements des espèces forestières. Faute de non disponibilité de données climatiques de la Nouvelle Aire Protégée de Tampolo, celles de la station météorologique de Fenoarivo-Antsinana sont considérées (Annexe 3).

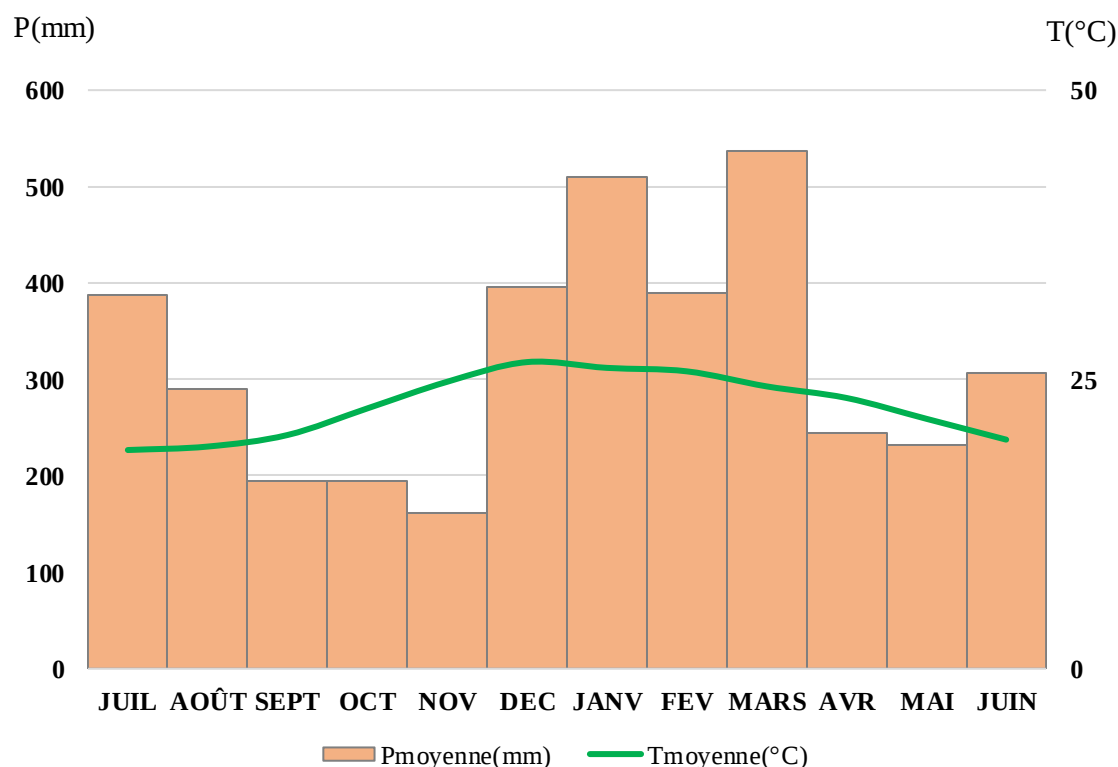


Figure 2 : Diagramme ombrothermique de Fenoarivo Antsinana (2001 - 2015)

Source : ESSA Forêt Tampolo.

L'analyse de ce diagramme ombrothermique montre que la région n'affiche pas une saison sèche bien marquée. La classification de Köppen-Geiger de ce site parmi le climat de type Af est encore valable. Selon cette classification, Tampolo est sous le régime d'un climat de la forêt tropicale humide avec des précipitations tous les mois de l'année et avec les précipitations du mois le plus sec supérieure à 60mm (KOTTEK et *al.*, 2006). La pluviométrie annuelle de Tampolo est évaluée à l'ordre de 3091,9 mm avec une Température moyenne annuelle de $22,7 \pm 1,2^\circ\text{C}$ et une amplitude thermique de $7,8 \pm 1,8^\circ\text{C}$. Située au bord de la mer et à une altitude d'environ 5m, le site est sous le régime direct des Alizés de l'Est qui apportent une importante humidité constante (RAJOELISON, 1997). La Nouvelle Aire Protégée de Tampolo est donc caractérisée par un climat tropical perhumide chaud. Concernant les aléas climatiques, cette région est fréquemment touchée par les cyclones tropicaux qui atteignent les côtes Est de Madagascar (3^{ème} rang mondiale des pays les plus fortement exposés aux cyclones tropicaux et 1^{er} rang

des pays africains), c'est-à-dire ceux qui se forment dans le Sud de l'Océan Indien (GOODMAN et RATSIRARSON, 2005).

Tableau 1: Caractéristiques générales et définition de la station de Fenoarivo Antsinana et ses environs

Auteurs / Années	Données climatiques	Caractéristiques bioclimatiques	Type bioclimatique
GAUSSEN (1995)	P et 2T	$P > 2T$	Région humide
AUBREVILLE (1970)	P et T	$1.500 < P < 5.000$ $24 < T < 27$	Tropicale humide
KOECHLIN et al. (1974)	P	$P > 2.000 \text{ mm}$	Perhumide
LAUER (1975)	T	$22 < T < 28$	Région chaude

Source : RAJOELISON, 1997

Lithologie et géomorphologie

La forêt de Tampolo est érigée sur une topographie toute plane. Du côté de la mer vers l'intérieur se succèdent trois crêtes de plage et des bas-fonds bordés par des marécages inondés le long de l'année (suivant la direction du ligne de rivage). Ces derniers ont souvent tendance à atténuer les microreliefs. La forêt se trouve le long d'une côte basse uniformément sableuse et s'étale sur des sédiments de l'ère Quaternaire.

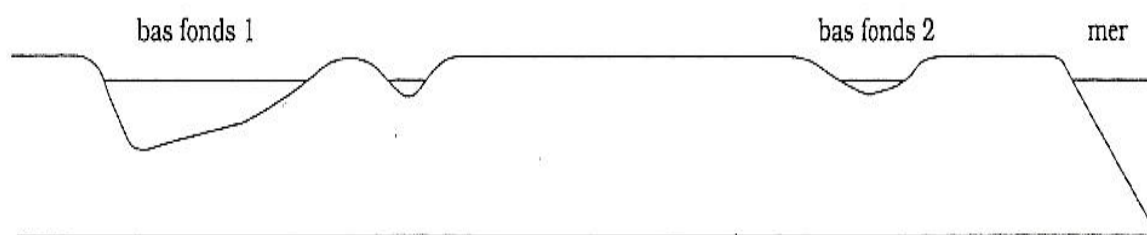


Figure 3 : Schéma de la topographie et du relief de la forêt de Tampolo

Source : RAJOELISON, 1997

Hydrographie

Deux lacs lagunaires constituent principalement le grand réservoir d'eau autour de la Nouvelle Aire protégée de Tampolo. Au Nord du site s'étend le grand lac Tampolo dont les dendrites Tetezambe

et Lohalava fournissent les marécages des bas-fonds et les marais alentours tel qu'au Sud, à fleur de la plage figure le petit lac Marofototra. Ces deux lacs sont en contact avec l'Océan Indien et sont accompagnés par des petits ruisseaux narrant à l'intérieur du site.

Pédologie

La forêt de Tampolo est caractérisée par un sol sableux, perméable et est pauvre en matière organique avec un acidité très élevée de pH égale à 2,7 dans la couche entre 0 et 20 cm. Les activités microbiennes et la décomposition de l'humus sont alors faibles et la disponibilité des litières diffèrent selon l'endroit de la forêt (GOODMAN et RATSIRARSON, 2005).

Tableau 2 : Types de sols sous la forêt de Tampolo en fonction de la position de la nappe phréatique

Types de sols	<i>Sols peu évolués</i>		
	<i>d'apport (régosols sur sable)</i>	<i>Sols podzoliques</i>	<i>Sols hydromorphes</i>
Lieux	En position topographique élevée et à nappe phréatique profonde.	En position topographie basse à nappe phréatique proche de la surface.	Dans les bas-fonds humides, inondés en permanence.

Source : KILIAN, 1965 in RAJOELISON, 1997

Flore et végétation

Par sa position géographique, la formation végétale de Tampolo est classée comme une forêt dense humide sempervirente de basse altitude. Les 103 parcelles délimitées par des layons conservent une couleur verdoyante durant toute l'année (HUMBERT et COURSDARNE, 1965). La forêt est constituée par trois strates de végétation pas assez distinctes, dont la strate supérieure arborescente dominée par *Intsia bijuga* et *Uapaca sp.* (10 à 20 mètres de hauteur), la strate moyenne composée des arbres de 6 à 10 mètres de hauteur et le reste constituée des arbustes, des lianes et des plantes herbacées (*Liliaceae*, *Rubiaceae*, *Melastomataceae*, ...).

Selon RAJOELISON, 1997 la particularité de la Forêt de Tampolo réside sur la présence de 4 types de forêts nettement dissemblable tel que :

- La forêt temporairement inondée caractérisée par des arbres de petite taille et un peuplement serré ;
- La forêt haute littorale qui est une vraie forêt dense humide sempervirente à cause de sa structure, ses caractéristiques biologiques et sa physionomie ;
- La forêt enrichie, appelé ainsi après l'enrichissement par *Aucoumea klaineana*, *Tarretia itilis*, *Canarium Madagascariensis* et *Intsia Bijuga* et enfin
- La forêt marécageuse dans les étangs des bas-fonds.

Milieu humain

Quatre fokontany environnent la Nouvelle Aire Protégée de Tampolo : Rantolava et Takobola au Nord, Tanambao Tampolo au centre, Adapa II au Sud. Ces villages se composent principalement de l'ethnie Betsimisaraka du Nord avec quelque population immigrante Antemoro, Betsileo et Merina (RAFILIPOARIJAONA, 2006). Ils comptent environs 5 000 habitants en 2018 (AVERTEM, 2018) avec toujours une population jeune. Autres que les autorités administratives légaux comme le chef Fokontany, les autorités traditionnelles existent encore (« Tangalamena » et les « Mpiampinjiny ») et coordonnent la vie relationnelle, cultuelle, et culturelle de la société (RADOSY, 2010). Les activités de production de la population autour de Tampolo sont principalement : la culture vivrière (riziculture, culture de manioc et patate douce), les cultures de rentes (girofle, café, canne à sucre, vanillier), les arboricultures (litchi, jacquier, agrumes, ...), les cultures maraîchères, le petit élevage (bovin, porcin, aviaire, apiculture), la pêche en eau douce et en mer et l'artisanat (vannerie, ...). En outre, l'exploitation forestière détient une place très importante dans la vie socio-économique de la population autour de Tampolo (prélèvement de bois ligneux, bois de chauffe, charbon,) et constitue même une menace imminente pour la Nouvelle Aire Protégée.

La « forêt haute » des formations littorales de Tampolo

Durant cette recherche, les interventions sont concentrées particulièrement au niveau de la forêt littorale proprement dite de Tampolo appelée « forêt haute », couvrant une superficie d'environ 120 ha. C'est une authentique forêt dense humide d'aspect toujours vert du fait de sa physiologie, de sa structure et de ses caractéristiques biologiques, d'ordre à la fois climatique et édaphique (Rajoelison L. G., 1997). Généralement étagée de trois strates, cette forêt occupe la grande superficie de la Nouvelle Aire Protégée. Les études pédologiques effectuées par RAJOELISON, 1997 mentionnent la présence des sol peu évolués d'apport, des sols podzoliques, des sols hydromorphes et tourbeux et des pseudopodzols de nappe tapissant cette forêt haute.

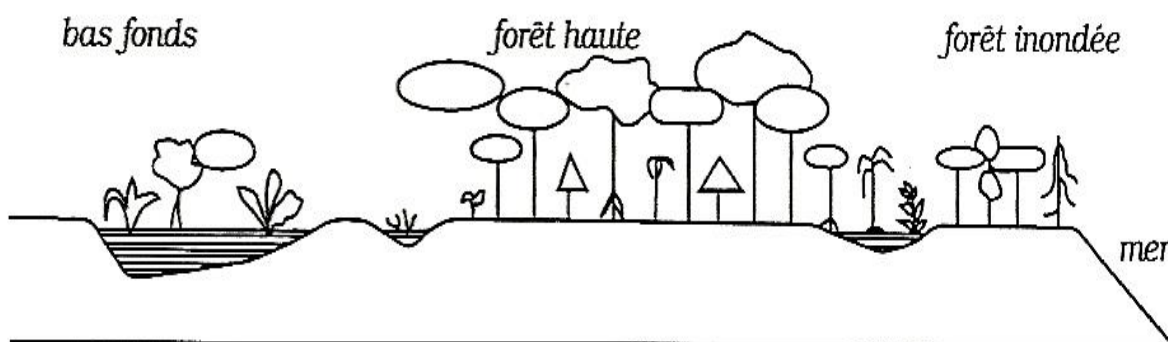


Figure 4 : Profil idéalisé de la forêt littorale de Tampolo

Source : RAJOELISON, 1997

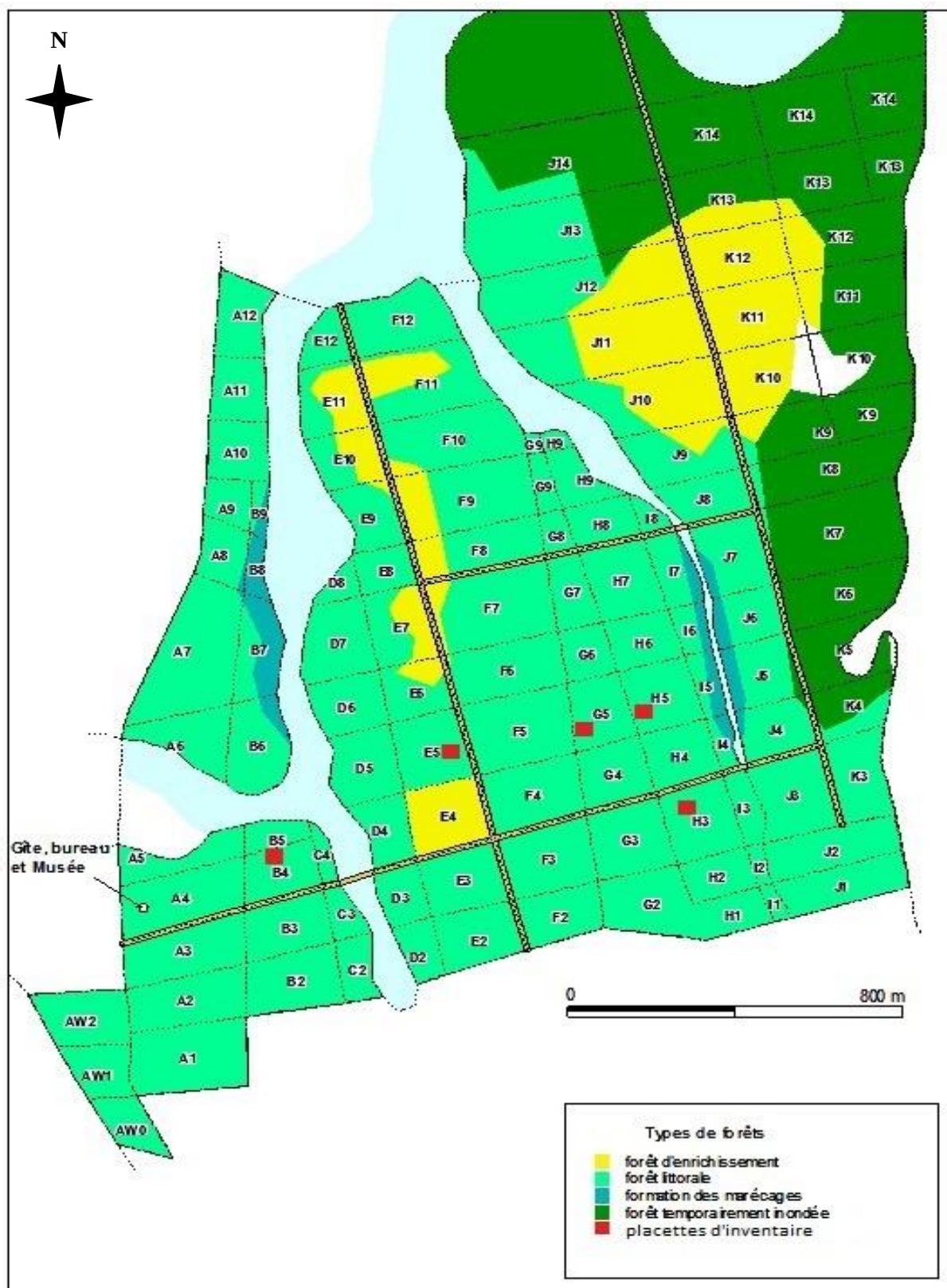


Figure 5 : Délimitation de la forêt haute de Tampolo et emplacement des unités d'inventaire

Source : RATSIRARSON et al., 2001. Modifié par auteur 2019

2.4. Méthodes de collectes de données : inventaire floristique

A part les études bibliographiques, des travaux de terrain ont été faites durant la recherche afin de mesurer les paramètres nécessaires dans la quantification de la biomasse aérienne de la forêt haute de Tampolo. Ces travaux consistent en des relevés floristiques dans cette forêt.

Tout d'abord, l'inventaire floristique a été réalisé par la méthode d'échantillonnage aléatoire simple. La population étudiée est définie par la forêt haute littorale de Tampolo et les observations se portent sur des placettes d'inventaires. L'inventaire intégrale n'est pas réalisable vue le temps d'intervention trop courte, l'équipe mobilisée composée seulement de 4 personnes et la vaste étendue de la zone d'étude. Cette méthode collectes de données par échantillonnage a été choisie du fait qu'elle est plutôt pratique et nécessite peu de temps.

Mise en place et caractéristiques des unités d'échantillonnages

Les relevés floristiques sont réalisés dans des unités d'échantillonnage appelés « placettes d'inventaires ». Elles sont tous en forme de carrés et orientées vers la direction Nord. La mise en place des unités d'échantillonnage se fait à l'aide d'une boussole pour avoir des angles droits dans chaque coin et une ficelle pour les délimiter. 14 piquets de 1m sont utilisés pour piquer les coins des unités et supporter les ficelles de délimitation. Cette hauteur est choisie pour que la délimitation soit bien visible. Des ficelles en nylon de différentes couleurs (rouge – bleu – blanc) sont choisies pour repérer facilement chaque unité d'échantillonnage.

Les unités d'échantillonnages se caractérisent comme suit :

- « *Compartiments A* » de dimension 20m x 20m soit 400m².
- « *Compartiments B* », choisis aléatoirement après division du compartiment A avec une dimension de 10m x 10m soit 100m².
- « *Compartiments C* », choisis aléatoirement après division de compartiment B avec une dimension de 5m x 5m soit 25m².

Seuils d'inventaire

La détermination des seuils d'inventaire et des paramètres à relever sur terrain sont indispensable avant de réaliser un inventaire quelconque. Les seuils utilisés durant l'étude sont alors résumés dans le tableau ci-après.

Tableau 3 : Seuls d'inventaires et paramètres relevés sur terrain

Compartiment	Surface en (m ²)	Seuils d'inventaire		Essence	D _{1,30m}	H _{totale}
		DHP en (cm)	Hauteur en (m)			
A	400	DHP ≥ 10cm	-	x	x	x
B	100	DHP < 10cm	H > 1,3m	x	x	x
C	25	-	0,1m < H < 1,3m	x	-	x

Pour ce faire :

- les arbres et les arbustes sont inventoriés dans le *compartiment A*,
- les jeunes bois sont inventoriés dans le *compartiment B*,
- les régénérations naturelles sont inventoriées dans le *compartiment C*.

Il est à remarquer que l'inventaire a été réalisé dans 5 placettes espacées de 500m tout au milieu des zones intactes ou les moins dégradées² de la forêt haute littorale pour avoir plus de fiabilité des données. Ces unités d'échantillonnage ont été placées donc dans les parcelles B4, E5, G5, H3 et H5. Ces parcelles sont choisies après un bref entretien fait auprès du chef du site de Tampolo et auprès du guide car ces zones sont affirmées les plus protégées et les moins pénétrées dans la Nouvelles Aires Protégée du fait qu'elles se placent à proximité des layons constituant des passages journaliers des patrouilleurs.

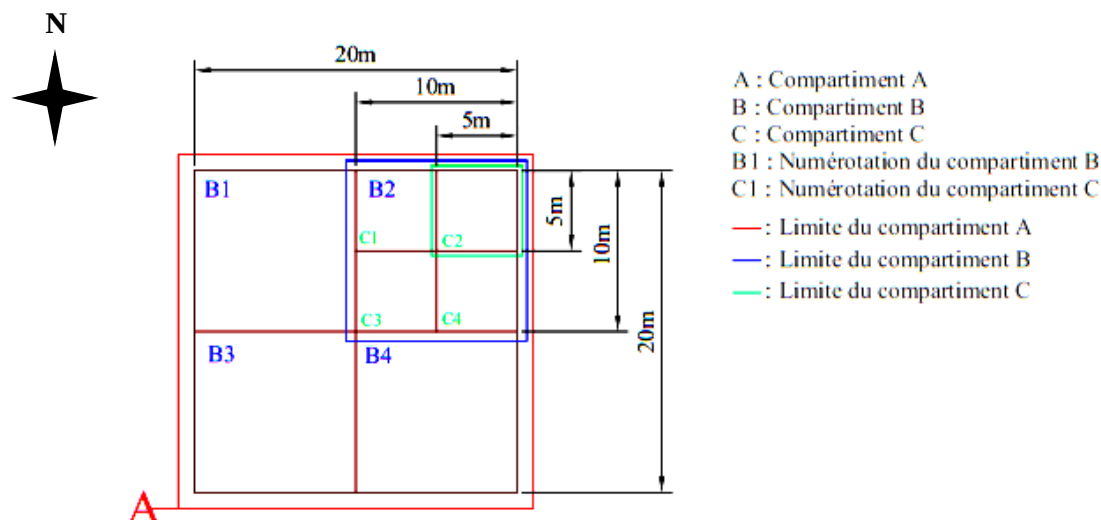


Figure 6 : Structure de l'unité d'échantillonnage

✚ Méthodes de mesure des paramètres

- Pour mesurer le diamètre des arbres : seul le mètre ruban est utilisé pour avoir la circonférence à 1,30 mètre du sol des ligneuses faute de non disponibilité de ruban dendrométrique. Cet instrument est alors choisi car sa manipulation est très pratique au plein cœur d'une forêt étroite. Un simple calcul est donc nécessaire pour le D_{1,30m}.

² Zones où les coupes ne dépassant pas cinq (5) pieds d'arbre abattu.

$$D_{1.30m} = \frac{C_{1.30m}}{\pi}$$

Avec $D_{1.30m}$ = diamètre à 1,30 mètres de l'arbre

$C_{1.30m}$ = circonférence à 1,30 mètres de l'arbre

Équation 1: Formule de calcul du $D_{1.30m}$ à partir du $C_{1.30m}$

- Pour la hauteur totale : une estimation simple est adoptée car seule le « blume-leiss » est disponible, or sa manipulation est trop laborieuse dans une forêt dense tropicale comme le cas de la forêt haute de Tampolo.
- **Remarque :** l'aide d'un guide local a permis d'apprécier les noms vernaculaires locales de chaque essence forestière. Les noms scientifiques sont travaillés à travers des bibliographies faute d'absence de botaniste qualifié sur place.

2.5.Méthodes d'analyse des données

Il est à noter que seules des données écologiques issues des travaux d'inventaire sont analysées et traitées. Pour ce faire, les étapes ci-après sont fondamentales :

2.5.1. Analyse structurale du peuplement

L'objectif de cette analyse est d'étudier la structure floristique et la structure spatiale du peuplement afin d'acquérir une indication respective sur les caractéristiques des essences qui composent le peuplement et sur son potentiel d'exploitabilité.

Structure floristique du peuplement

Elle apporte les informations sur la composition floristique du peuplement en étudiant :

- *La richesse floristique* : qui donne le nombre total d'espèce présente sur une surface donnée.
- *La diversité floristique* : qui présente la manière de répartition des espèces entre les individus présents. Elle peut être exprimée par le *coefficient de mélange*.

- Coefficient de mélange CM :

$$CM = \frac{\text{Nombre d'espèces}}{\text{Nombre d'individus}}$$

Équation 2 : Formule de calcul du coefficient de mélange

🚦 Structure spatiale du peuplement

Cette structure correspond à l'analyse de structure horizontale et verticale du peuplement (RAJOELISON, 1997), mais cette étude se focalise seulement sur l'analyse horizontale qui est représenté par *l'abondance, la dominance et la contenance*. De plus, le *coefficient d'élancement* est calculé afin d'évaluer la stabilité du peuplement.

- Abondance : qui traduit le nombre de tige dans le peuplement ou densité du peuplement et est exprimé en N/Ha
- Dominance : elle est exprimée par la surface terrière G en m²/Ha du peuplement et informe sur le degré de remplissage de la forêt. C'est une valeur nécessaire pour suivre l'évolution du peuplement dans son ensemble. Elle permet aussi d'effectuer la comparaison rapide entre différents peuplements et est exprimée par la formule :

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n gi}{S} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\pi}{4} \cdot Di^2 (1.30m)}{S}$$

Avec : gi = surface terrière de l'individu i

$Di(1.30m)$ = diamètre à 1.30 mètre de l'arbre

S = surface de la placette en Ha

Équation 3 : Formule de calcul de la surface terrière

- Contenance : elle est évaluée par la somme des volumes des individus dans la parcelle. Pour le cas de la forêt haute de Tampolo, qui est une forêt naturelle, le volume est exprimé par :

$$V = \sum_{i=1}^n 0,53 \cdot gi \cdot H_{totale}$$

Avec gi = surface terrière de l'individu i

H_{totale} = hauteur totale de l'arbre

Équation 4 : Formule de calcul du volume

- Coefficient d'élancement CE : elle indique la stabilité du peuplement qui est classé selon que :
 CE > 100 : peuplement instable
 CE < 100 : peuplement stable

$$CE = \frac{H_{totale}}{D_{1,30m}}$$

Avec H_{totale} = hauteur totale de l'arbre

$D_{1,30m}$ = Diamètre de l'arbre à 1,30 mètres du sol

Équation 5 : Formule de calcul du coefficient d'élancement

2.5.2. Estimation de la biomasse aérienne et le stock de carbone

 Biomasse aérienne

Selon (GOULD, 1966) ; (BASTIEN et al., 2008), l'« allométrie » est la différence entre les proportions des différentes parties ou organes d'un organisme en fonction de la taille de cet organisme. C'est l'étude des relations entre la taille et la forme des organismes. Ce modèle allométrique permet alors de convertir des mesures facilement disponibles, en quantités difficilement accessibles directement sur le terrain. Cette approche consiste à estimer la biomasse en appliquant des équations allométriques appropriées à la forêt concernée. RAZAKAMANARIVO, 2005 définit donc la régression allométrique par une fonction mathématique établie à partir des mensurations des arbres échantillonnés : les poids de troncs et autres sont reliés à des mesures linéaires comme le diamètre ou la hauteur de l'arbre pour déduire les premières valeurs de secondes, plus faciles à obtenir. Ainsi la présente étude se focalise sur l'utilisation des équations allométriques donc méthode non destructive.

Plusieurs modèles d'équations standards internationales spécifique aux différents types de forêts ou de régions tropicales ont déjà été développés par plusieurs auteurs mais de manière générale, ces équations ont la forme d'une équation de régression d'expression générale (VIELLEDENT, 2010) :

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_i + \varepsilon_i$$

Tel que $\varepsilon_i \sim N(0, \delta^2)$

Pour estimer les paramètres du modèle (β_0, β_1) avec :

Y_i = variable observée pour l'observation i

δ^2 = variance des résidus

X_i = Variable explicative ou covariable
pour l'observation i

β_0 = « intercept » ou ordonnée à l'origine

ε_i = Erreur ou résidu pour l'observation

β_1 = « slope » ou pente o effet de x sur y

Équation 6 : Equation de base de la régression linéaire

Durant cette étude, l'équation allométrique utilisée est choisie suivant les conditions climatiques et les types de forêts étudiées c'est-à-dire une équation allométrique spéciale aux forêts humides de Madagascar. En plus l'équation contenant plus de paramètres offre plus de précision (KETTERINGS et al., 2001) donc celle choisie ci-après comporte trois paramètres tel que le $D_{1,30m}$, la hauteur totale et la densité des espèces échantillonnées. En effet l'équation de (VIEILLEDENT et al., 2012), une régression allométrique conçue spécialement pour Madagascar est retenue :

$$AGB_{[est]} = e^{[-1,948 + 1,969 \cdot \ln(D_{1,30m}) + 0,660 \cdot \ln(H_{tot}) + 0,828 \cdot \ln(\rho)]}$$

Avec $AGB_{[est]} = \text{Biomasse aérienne (kg)}$

$e = \text{Fonction exponentielle}$ $\ln = \text{Logarithme népérien}$ $\rho = \text{infradensité du bois (g.cm}^3\text{)}$

$D_{1,30m} = \text{Diamètre à 1,30 mètre de l'arbre (cm)}$

$H_{totale} = \text{Hauteur totale de l'arbre (m)}$

Équation 7 : Equation de régression pour la biomasse aérienne

Les infra-densités ou densité anhydre des arbres ont été obtenus à partir de la densité à 12% (Annexe 1) par la formule suivante :

$$\rho = 0,8 \cdot \rho_{12\%} - 0,03$$

Avec $\rho = \text{Infra - densité du bois (g.cm}^{-3}\text{)}$

$\rho_{12\%} = \text{Densité de l'arbre à 12\%}$

Source : RAZAFIMAHATRATRA. Comm. Pers.³

Équation 8 : Conversion de la densité à 12% de l'arbre en infra-densité

Il est à remarquer que les infra-densités des essences qui ne sont pas observées sont fixées à 0,61⁴ car la forêt haute littorale de Tampolo est classée parmi les forêts humides de l'Afrique.

³ RAZAFIMAHATRATRA R., assistant de recherche au niveau de l'Unité de Formation et de Recherche Sciences et Technologies du bois, ESSA-Forêts.

⁴ Selon (GIEC, 2006) ; (REYES et al., 1992), pour l'Afrique, la valeur générique de ρ est de 0,58 à 0,61. Pour cette étude 0,61 est utilisée pour la simplification.

✚ Conversion de la biomasse aérienne en stock de carbone

De nombreuses études montrent que le contenu en carbone du bois correspond approximativement à la moitié de sa masse anhydre (BASUKI *et al.*, 2009). Cependant, d'autres études signalent que cette valeur peut varier selon les espèces mais généralement proche des 50% (WEST, 2009). La quantité de biomasse obtenue à partir de l'équation 7 a donc été utilisée pour évaluer directement la quantité de carbone stockée en admettant le coefficient usuel 0,5 de conversion de biomasse aérienne totale en carbone (BROWN, 2002).

$$\text{Stock de carbone aérien} = \text{biomasse aérienne} \times 0,5$$

Équation 9 : Relation stock de carbone et biomasse aérienne

2.5.3. Outil d'analyse des données :

Seul le logiciel Microsoft Excel 2019 a été utilisé dans les analyses et les traitements de données. Le tableau croisé dynamique inclus dans ce tableur a permis d'effectuer différents calculs et confrontations aisés des données recueillies lors de la phase de terrain. Ce fait constitue une limite de cette étude car d'autres logiciels statistiques pourraient pousser le travail dans des analyses plus profondes.

2.6. Cadre opératoire :

Tableau 4 : Cadre opératoire pour les hypothèses

Question principale	Hypothèses	Indicateurs	Résultats attendus	Méthodes objectives
Qui est-ce-qui caractérise la quantité de la biomasse aérienne des espèces ligneuse au niveau de la forêt haute littorale de Tampolo ?	1- La quantité de biomasse aérienne de la forêt haute littorale de Tampolo varie selon les espèces.	- Nom vernaculaire de chaque espèce ligneuse de la forêt - Origine de chaque espèce - Abondance des espèces dominantes (densité) - Surface terrière des espèces dominantes - Volume des espèces dominantes - D1.30cm - Hauteur totale - Infra-densité	- Caractéristiques floristiques du peuplement. - Structures floristiques du peuplement. - Quantité de biomasse aérienne des espèces du peuplement. - Différence de la quantité de biomasse aérienne entre les essences dominantes.	- Détermination de la dominance, de l'abondance, de la contenance et des structures du peuplement. - Estimation de la biomasse aérienne de chaque espèce ligneuse. - Comparaison par analyse comparative.
	2- La quantité de la biomasse aérienne de la forêt haute littorale de Tampolo ainsi que son stock de carbone diffèrent selon les strates.	- Types de strate - Abondance des espèces ligneuses dans chaque strate (densité) - Surfaces terrière de chaque strate - Volume des espèces dans chaque strate - D1.30cm - Hauteur totale - Infra-densité	- Caractéristiques floristiques du peuplement. - Structures floristiques du peuplement. - Quantité de biomasse aérienne de chaque strate. - Critères de classification des strates. - Stock de carbone de chaque strate. - Différence de quantité de biomasse aérienne entre chaque strate. - Différence de stock de carbone entre chaque strate.	- Détermination des caractéristiques de chaque strate. - Détermination du volume totale de chaque strate. - Estimation de la biomasse aérienne de chaque strate. - Estimation du stock de carbone de chaque strate. - Comparaison par des analyses comparatives.

2.7. Résumé méthodologique :

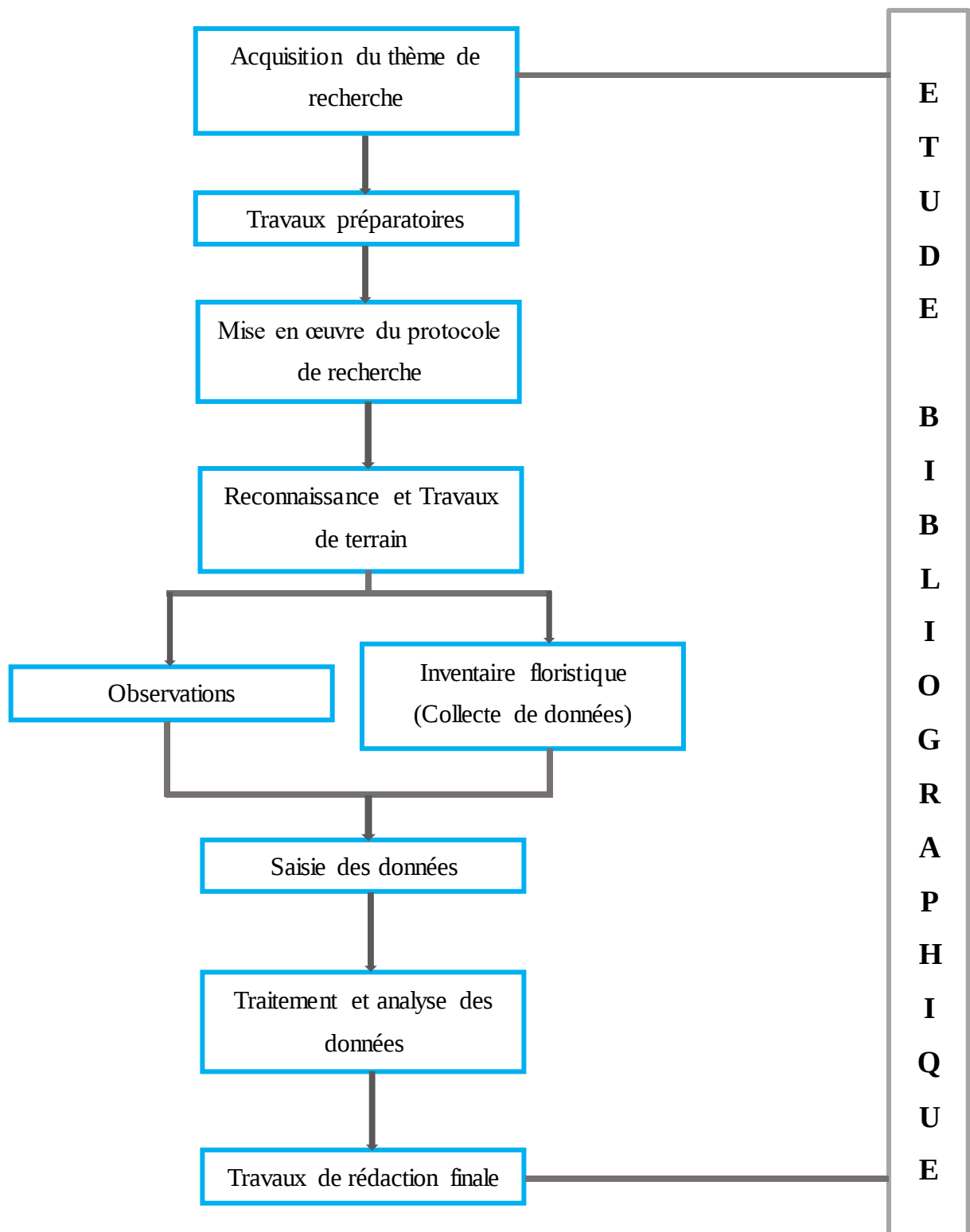


Figure 7 : Démarche méthodologique

3. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

3.1. Structure floristique du peuplement

3.1.1. Composition floristique du peuplement

La composition floristique informe sur la richesse floristique du peuplement c'est-à-dire l'ensemble des espèces végétales présentes instantanément dans un peuplement donné. Dans la forêt haute littorale de Tampolo, 57 espèces ont été inventoriées, réparties dans 35 familles et dont 5 espèces sont difficilement identifiables (Annexe 1). Elle apporte aussi des précisions sur les espèces dominantes du peuplement.

Tableau 5 : Liste floristique des espèces les plus abondantes

Espèce	Nom vernaculaire	Famille	N/Ha	Fréquence (%)
<i>Draceana reflexa</i>	Kesikesika	CONVALLARIACEAE	1 475	18,10
<i>Homalium thouarsianum</i>	Hazombato	SALICACEAE	815	10,00
<i>Noronhia buxifolia</i>	Tsilaitra	OLEACEAE	650	7,98
<i>Protorhus dintimena</i>	Hazombarorana	ANACARDIACEAE	610	7,48
<i>Coffea sp</i>	Kafe ala	RUBIACEAE	505	6,20

Il est ressorti que le nombre d'individu à l'hectare de chaque espèce dominante varie aux environs de 500 à 1 500 pieds. Il est à remarquer que *Draceana reflexa* et *Homalium thouarsianum* dominent principalement la population du site. Autres que ces espèces dominantes, les familles les plus présentes aussi sont relevées dans cette composition floristiques.

Tableau 6 : Liste des familles les plus abondantes

Famille	N/Ha	Fréquence (%)
CONVALLARIACEAE	1 475	18,10
RUBIACEAE	1 030	12,64
SALICACEAE	980	12,02
EUPHORBIACEAE	730	8,96
OLEACEAE	650	7,98

Les familles des espèces dominantes sont également les plus représentées dans la population sauf les *EUPHORBIACEAE* qui est plus dominante par rapport à la famille des *ANACARDIACEAE*. Le nombre des individus par famille à l'hectare varie de même aux environs de 600 à 1 500.

3.1.2. Diversité floristique du peuplement

La diversité floristique du peuplement est appréciée par son coefficient de mélange CM. Pour la forêt haute littorale de Tampolo CM est égale à 1/31 c'est-à-dire que dans 1 hectare inventorié, 31 individus de même espèce sont rencontrés. De ce fait le peuplement du site qui est une forêt naturelle dense humide tend vers la pluri-spécificité.

3.2. Structure spatiale du peuplement

3.2.1. Analyse horizontale

Abondance – Dominance – Contenance

Les trois paramètres caractéristiques de la structure spatiale du site sont représentés en valeurs absolues par compartiment de relevé floristique dans le tableau 7. Il est à remarquer que la dominance et la contenance dans le compartiment C ne sont pas calculées car les diamètres des régénérations ne font pas partis des paramètres de relevés floristiques.

Tableau 7 : Paramètres d'appréciation de la structure spatiale du peuplement

Compartiments	Abondance (N/Ha)	Dominance (m ² /Ha)	Contenance (m ³ /Ha)
A	370	10,52	72,52
B	21 600	12,62	40,89
C	61 040	-	-

De ce tableau ressort que :

- Les régénérations naturelles sont très abondantes dans le peuplement même si elles n'ont pas encore leurs places définitives dans le peuplement haute littorale, en raison de 305 200 individus qui dépassent largement l'abondance des individus du compartiment A et B.
- Le degré de remplissage absolu du compartiment B est plus dominant que ceux du compartiment A. Une simple comparaison indique alors que les arbres de gros diamètre n'arrivent pas à couvrir la surface terrière occupées par les arbres à petits et moyens diamètres.
- Contrairement à la dominance, le compartiment A affiche le plus grand volume dans le peuplement. Ce résultat est expliqué par le fait que les arbres dans le compartiment A possèdent les plus gros diamètres et les plus dominants en hauteur.

Stabilité du peuplement

La stabilité du peuplement est appréciée à partir du coefficient d'élancement moyen du peuplement. Les analyses affichent que dans le compartiment A, ce coefficient CE est équivalent à 73,66 donc les arbres de gros diamètres et d'hauteur considérable du site sont très stables et résistants aux perturbations.

Cependant, CE est de 219,78 dans le compartiment B ce qui indique un peuplement très instable. En définitif, le peuplement de la forêt haute littorale est instable donc fragile aux perturbations anthropiques et aux aléas climatiques.

3.2.2. Analyse verticale

Cette analyse met en exergue la structure des hauteurs du peuplement en fonction du nombre d'individu présent. A l'aide de la figure 6 qui illustre la distribution de fréquence des tiges en fonction de la hauteur totale par classe de 2 mètres, cette structure peut mettre en évidence la stratification de la forêt.

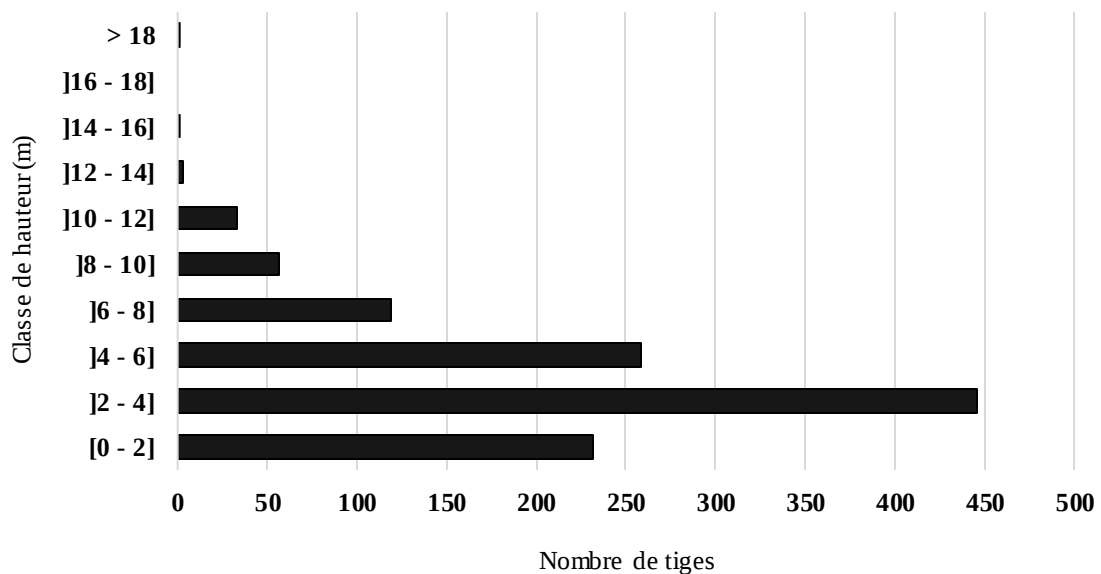


Figure 8 : Structure des hauteurs du peuplement

De cette figure ressort que la forêt haute littorale de Tampolo présente trois strates à savoir une strate supérieure composée des arbres supérieurs à 14 mètres, une strate intermédiaire composée des arbres entre 8 à 14 mètres et une strate inférieure très dense formée par les arbres à moins de 8 mètres de hauteur. De ce fait, cette forêt conserve encore l'aspect d'une forêt naturelle malgré des coupes sélectives des arbres à gros diamètres observées dans les unités d'inventaires.

3.3. Structure totale du peuplement

Cette structure totale donne la distribution du nombre d'arbres suivant les classes de diamètre. Le graphique ci-après permet d'avoir une idée sur cette distribution du nombre de tiges par classe de 5 mètres au niveau de la totalité du peuplement. Il est mis en évidence que le peuplement de la forêt haute littorale est assez pauvre en tiges de gros diamètre. Le site est fortement couvert de nombreux jeunes arbres de 5 à 15 centimètres de diamètre issus des régénérations naturelles. Cette dominance en effectif des jeunes bois pourrait être causée par différentes perturbations pesant sur le peuplement tels que les prélèvements illicites, les effets de l'ancienne exploitation légale et les cyclones frappant notamment cette zone.

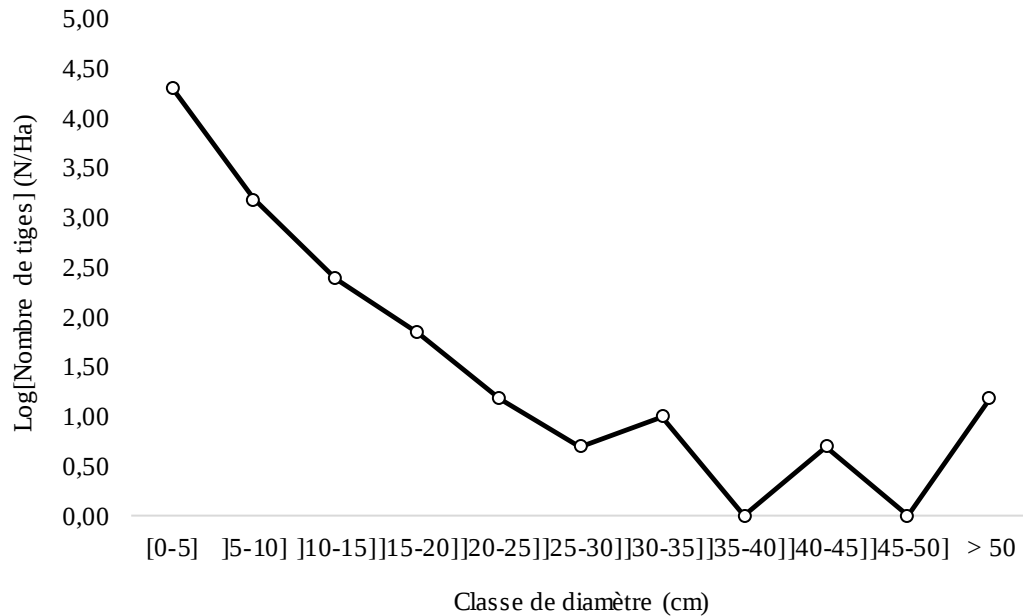


Figure 9 : Structure totale du peuplement de la forêt haute de Tampolo

Avec une température ambiante et une précipitation abondante, ces faits éclaircissent le sous-bois donc favorisent le développement rapide des régénérations naturelles et la germination des graines.

3.4. Biomasse aérienne

Il est à remarquer que la biomasse aérienne dans le compartiment C n'a pas pu être calculée avec la régression allométrique. Cette opération est impossible car le seuil d'inventaire dans ce compartiment est limité par la hauteur des régénérations naturelles donc ses diamètres ne sont pas mesurés d'où le manque de paramètre pour l'équation. La biomasse évoquée par la suite concerne alors les deux compartiments A et B.

3.4.1. Biomasse aérienne par espèce

Après l'application de l'équation allométrique adoptée, des résultats sur l'estimation de la quantité de biomasse épigée de chaque espèce sont ressorties et récapitulées dans le tableau ci-après. Les calculs de biomasse à partir de la régression allométrique ont ressortis que la quantité de biomasse contenue dans chacune des essences recensées varie largement de 0,01 Mg/Ha pour *Pittosporum* sp. à 14,67 Mg/Ha pour *Cleistanthus capuronii*. Cette grande différence pourrait être due non seulement aux caractéristiques particulières de chaque espèce (diamètre à 1,30 mètres, hauteur totale, infra-densité) mais dépend aussi fortement de la dominance de chaque espèce.

Tableau 8 : Biomasse aérienne par espèces en Mg/Ha

Nom scientifique	Biomasse aérienne Mg/Ha	Nom scientifique	Biomasse aérienne Mg/Ha
<i>Cleistanthus capuronii</i>	14,67	<i>Bosqueia obovata</i>	0,80
<i>Homalium thouarsianum</i>	11,23	<i>Stephanostegia capuronii</i>	0,69
<i>Protorhus dintimena</i>	9,91	<i>Homalium involucratum</i>	0,58
<i>Intsia bijuga</i>	9,62	<i>Oncostemum elephantipes</i>	0,58
<i>Syzigium</i> sp.	9,49	<i>Cinnamosma madagascariensis</i>	0,55
<i>Asteropeia amblyocarpa</i>	5,26	<i>Dialium unifoliatum</i>	0,54
<i>Draceana reflexa</i>	5,25	<i>Diospyros squamosa</i>	0,53
<i>Dicoryphe stipulacea</i>	4,44	<i>Symphonia fasciculata</i>	0,48
<i>Noronhia buxifolia</i>	3,24	<i>Cuphocarpus aculeatus</i>	0,47
<i>Liane</i>	2,50	<i>Tambourissa religiosa</i>	0,45
<i>Canthium</i> sp.	2,17	<i>Labramia bojeri</i>	0,43
<i>Ocotea</i> sp.	2,15	<i>Rhotmannia</i> sp.	0,40
<i>Memecylon</i> sp.	2,10	Non identifié 3	0,37
<i>Ravensara acuminata</i>	1,83	<i>Erythroxylum</i> sp.	0,37
<i>Dombeya laurifolia</i>	1,55	<i>Diospyros haplostylis</i>	0,32
<i>Rhodocolea</i> sp.	1,49	<i>Cerbera venenifera</i>	0,27
<i>Brochoneura acuminata</i>	1,47	<i>Olax</i> sp.	0,23
<i>Uapaca</i> sp.	1,41	Non identifié 2	0,21
<i>Phyllarthron articulatum</i>	1,40	<i>Syzigium pluricymosa</i>	0,16
<i>Xyopia</i> sp.	1,24	<i>Asteropeia rhopoldes</i>	0,11
<i>Gaerineria</i> spp.	1,22	Non Identifié 5	0,05
<i>Eremolaena rotundifolia</i>	1,07	<i>Tinopsis</i> sp.	0,04
<i>Ambavia geraldii</i>	1,01	<i>Schizolaena</i> spp.	0,03
<i>Elaeocarpus alnifolius</i>	1,00	<i>Scolopia erythrocarpa</i>	0,03
Non identifié	0,96	<i>Burasia madagascariensis</i>	0,03
<i>Symphonia</i> sp.	0,93	Non identifié 4	0,03
<i>Coffea</i> sp.	0,93	<i>Canthium medium</i>	0,02
<i>Polyalthia ghesquieriana</i>	0,92	<i>Pittosporum</i> sp.	0,01
<i>Sideroxylon betsimisarakum</i>	0,82	TOTAL	110,10

Les espèces qui contiennent beaucoup de biomasse sont celles qui atteignent un diamètre et hauteur élevés à grand effectif dans le peuplement et peut être celles qui ont des infra-densités élevés.

3.4.2. Biomasse aérienne par strate

Après avoir identifié la structure verticale de la forêt haute de Tampolo, il est affirmé qu'elle est constituée de trois strates. Pareillement aux espèces, la même équation allométrique a permis de calculer l'estimation de la biomasse aérienne totale respective de chacun des étages du peuplement. Les biomasses épigées de chaque essence recensée sont donc groupées selon la classe de hauteur constituant chaque strate (tableau 9).

Tableau 9 : Biomasse aérienne de chaque strate en Mg/Ha

Strates	DHP $\leq$ 8 cm	8 cm < DHP $\leq$ 14 cm	DHP > 14 cm	TOTAL
Biomasse aérienne (Mg/Ha)	38,19	43,51	28,39	110,10

La strate intermédiaire est le plus grand réservoir de biomasse dans la forêt haute littorale de Tampolo avec un taux de 39 %. La strate inférieure réserve d'un côté 35 %, donc la dominance des arbres reste encore un grand facteur de stockage au niveau de la biomasse aérienne. La strate supérieure constituée par les grands arbres contribue ainsi peu dans le stock de biomasse aérienne avec un taux de 26%.

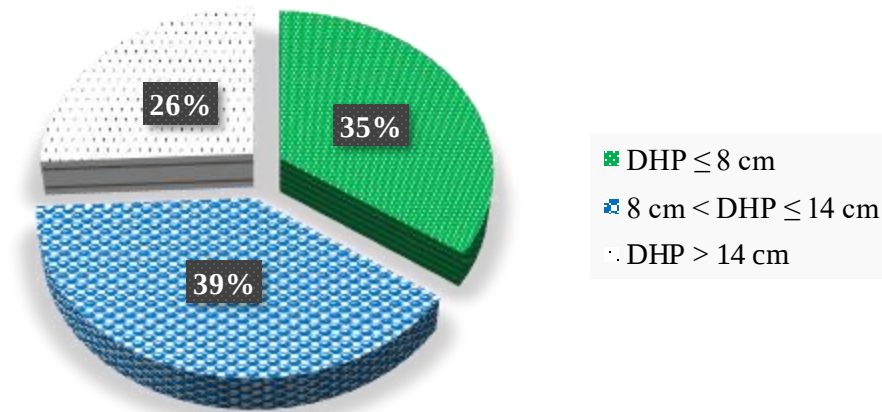


Figure 10 : Répartition des biomasses aérienne par strate (Mg/Ha)

La biomasse aérienne de la strate intermédiaire et celle de la strate inférieure ne se différencie pas trop par le fait que la strate intermédiaire est composée de plusieurs tiges de taille moyenne et la strate inférieure est constituée par de nombreuses arbustes. Ces arbustes couvrent une surface très importante dans le peuplement. De ce fait, la biomasse épigée d'une strate de peuplement forestier dépend largement du nombre d'individu qui la compose. Mais de la dimension des arbres influence aussi cette quantité vue.

3.5. Stock de Carbone de la forêt haute littorale

3.5.1. Stock de Carbone par espèce et par strate

Les stocks de carbone sont calculés par la valeur de la biomasse de chaque espèce. Suite à la formule de calcul (Equation 8), ces stocks correspondent à la moitié de la quantité de biomasse aérienne. Analogiquement, l'interprétation revient donc au même ; *Pittosporum* sp. avec 1 380,56 KgC stocke le plus de carbone dans le peuplement et *Cleistanthus capuronii* en conserve le moindre avec 0,36 KgC. Le stock de carbone des espèces dépend aussi alors de ses caractéristiques : technologiques (infra-densité), physique (diamètre à 1,30 mètre et hauteur totale) mais aussi de son abondance dans le peuplement.

Pour les strates, cette analogie est toujours valable d'où le plus grand stock de Carbone réside au niveau de la strate intermédiaire et inférieure avec une valeur respective de 21,76 KgC/Ha et de 19,10 KgC/Ha. La dominance des arbres dans une strate d'un peuplement forestier conditionne alors sa richesse en stock de carbone.

Tableau 10 : Distribution du stock de carbone par strate en Mg/Ha

Strates	DHP ≤ 8 cm	8 cm < DHP ≤ 14 cm	DHP > 14 cm	TOTAL
Stock de C (MgC/Ha)	19,10	21,76	14,19	55,05

3.5.2. Stocks totaux de Carbone de la forêt haute littorale de Tampolo :

Par l'intermédiaire du tableau 9, une estimation des stocks totaux de carbone par hectare de la forêt haute est possible à partir de la quantité des biomasses aériennes.

Tableau 11 : Biomasses et Stocks de Carbone totaux de la forêt haute

Compartiments	Biomasse aérienne (Mg/Ha)	Stock de carbone (MgC/Ha)
A	62,33	31,17
B	47,76	23,88
Totaux	110,10	55,05

Il est ressorti que la forêt haute littorale de Tampolo stocke au total environ 55,05 MgC⁵ à l'hectare. Les arbres plus de 10cm de diamètre constituent 57% de ce stock c'est-à-dire 31,17 MgC à l'hectare. Les arbres ayant un diamètre inférieur à 10cm et une hauteur supérieure à 1,30m complète donc cette quantité avec 43% avec 23.88 MgC à l'hectare. Il est à remarquer toujours que les biomasses dans les régénérations naturelles et celles sous-terraines ne sont pas considérées dans cette estimation.

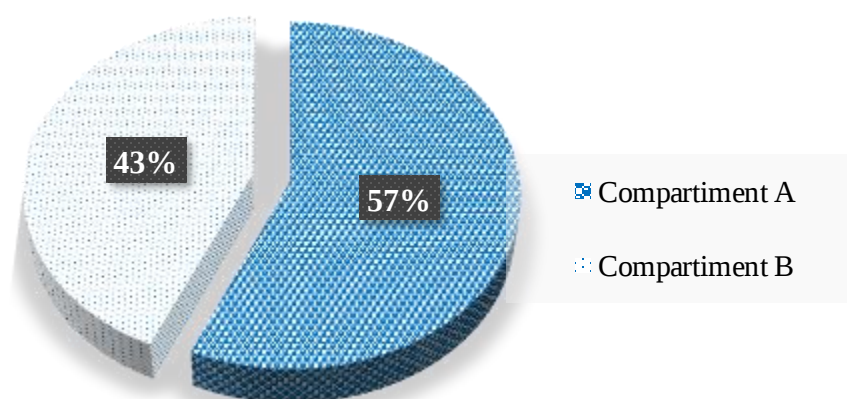


Figure 11 : Proportion de Stocks totaux de Carbone en MgC/Ha

⁵ 1MgC = 1tC

4. DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

Tout au long de cette partie, des commentaires et des comparaisons avec les recherches d'autres auteurs sont émis sur la méthodologie et les résultats. Elle discute aussi des hypothèses émises auparavant, donne des recommandations pour les autres futures recherches et pour la société autour de la Nouvelle Aire Protégée de Tampolo.

4.1. Discussions

4.1.1. Sur l'approche méthodologique

Plusieurs outils et méthodes ont été utilisés durant cette étude. Cette combinaison constitue un atout majeur de la recherche. En premier lieu, l'investigation bibliographique a été primordiale tout au long de ce travail et a servi de référence sur les méthodes à adopter ainsi que les résultats à avoir. La régression allométrique est la principale méthode d'approche choisie donc une équation allométrique (VIEILLEDENT *et al.*, 2012) a été choisie pour la quantification de la biomasse. L'équation choisie est parmi la plus précise car elle intègre trois paramètres dendrométriques et technologiques de l'arbre. Cette méthode indirecte se basant sur des mesures dendrométriques s'avère la moins onéreuse, la plus pratique et la plus respectueuse de l'écosystème car d'un côté l'accessibilité et les limitations des coupes d'arbre constituent des limites majeures pour la méthode directe destructive (RAKOTO RATSIMBA, 2011), de l'autre côté les analyses en laboratoire nécessitent beaucoup plus de temps et sont très coûteuses. L'estimation de la quantité de la biomasse dans cette étude se focalise seulement sur la biomasse aérienne faute de manque de temps mais le plus idéal serait de travailler en surplus dans la biomasse et les stocks de Carbone de la litière et racinaire. Ces deux compartiments constituent un grand réservoir de biomasse et stockent un taux de carbone non négligeable car pour la forêt dense sèche du Sud-Ouest de Madagascar, la biomasse racinaire est d'environ 11,59 Mg à l'hectare (RAZAKAMANARIVO, 2005) d'où plus proche de la strate inférieure de la forêt haute littorale.

Néanmoins, les méthodes appliquées possèdent quelques failles tant sur les méthodes de collectes de données que sur les méthodes d'analyses et calculs. Les diamètres au collet des régénérations dans le compartiment C devraient être mesurés pour pouvoir les intégrer dans d'autres équations allométriques. Ce paramètre est nécessaire pour augmenter la précision de l'estimation de la biomasse aérienne car ces très jeunes arbres sont très abondants dans le peuplement. De plus, l'accès aux infra-densités de chaque espèce inventoriée est très difficile. Ce paramètre constitue donc une source d'erreur dans la régression allométrique car il a fallu utiliser le $\rho = 0,61 \text{ g.cm}^{-3}$ considéré par le GIEC comme infra-densité utilisable en Afrique pour les espèces à propriétés technologiques inconnues. Enfin, l'existence de 4 essences considérées comme « *inconnue* » repose sur le fait que le temps est très limité d'où la réalisation d'un herbier est impossible pour les identifier. Toutefois, ces limites n'ont pas d'influences sur les résultats acquis.

4.1.2. Sur les résultats

 Sur l'analyse de peuplement

L'analyse structurale du peuplement de la forêt haute de Tampolo a permis de recenser 57 espèces réparties dans 35 familles. Ces chiffres permettent d'entrevoir une grande richesse floristique de la forêt. Mais la confrontation de ces résultats avec ceux de (RAJOELISON, 1997) attribue une large différence surtout sur les essences car ils ont inventorié aux environs 130 espèces et 40 familles principalement *RUBIACEAE* et *EUPHORBIACEAE* qui dominent toujours le peuplement. Cette différence réside probablement sur le fait que la surface totale d'échantillonnage de la présente étude est trop faible allant de 0,26 Ha or l'étude en 1997 utilise 0,42 Ha et (LAMPRECHT, 1975) trouve que dans une forêt dense humide de plaine de l'Amérique du Sud, cette surface est de 1 Ha. Contrairement à la forêt dense humide du Congo et Zaïre dont l'aires minimales sont respectivement 0,02 Ha et 0,11 Ha (MANGENOT, 1959) et (GERARD, 1960). La conception de la courbe aire-espèce est alors nécessaire durant la phase de descente sur terrain même, pour avoir l'aire minimale d'échantillonnage. A part cette courbe, la définition de cette surface de relevé pourrait aussi être dépendante de l'objectif de l'étude. Si le but est d'étudier la flore de la zone d'étude, le travail demande une aire de relevé beaucoup plus grande comme le cas de (MATE, 2008) qui a trouvé 284 espèces, 158 genres répartis en 86 familles à Analamazaotra et le (GERP, 2008) qui a recensé 310 espèces, 158 genres divisés en 70 familles à Maromizaha.

L'abondance du peuplement est assez faible (23,04 m²/Ha) et correspond à la moitié de celle du corridor Ankeniheny-Zahamena variant de 20 à 50,8 m²/Ha (ANDRIAMALALA et *al.*, 2011). Ce résultat est dû au degré de densité de la forêt haute de Tampolo qui est assez faible que ceux de l'autre site.

 Sur la biomasse aérienne et les Stocks de Carbone

✓ Biomasse aérienne à l'échelle locale

Suite aux résultats de l'étude, la biomasse aérienne totale de la forêt haute littorale de Tampolo est estimée à 110,10 Mg/Ha. Cette valeur reste faible même si la précision de l'équation allométrique utilisée est assez forte ($R^2 = 0,95$) (VIEILLEDENT et *al.*, 2012) car RAJOELISON, 1997 a trouvé 212,17 Mg/Ha. La différence pourrait résider en premier lieu sur la méthode utilisée car ils ont estimé cette quantité par calcul séparé de la biomasse du tronc, de la biomasse des branches et de la biomasse des feuilles à partir du biovolume des arbres. La biomasse épigée de la présente étude s'avère donc sous-estimée. La situation de la forêt de Tampolo durant ces dernières années aussi pourrait expliquer cette différence car la pression anthropique menace la Nouvelle Aire Protégée et actuellement, les coupes sélectives dominant. De ce fait, les grands arbres, principaux réservoirs de biomasse épigée sont exploités illicitement.

✓ Stock de Carbone à l'échelle nationale

Une comparaison du Stock de Carbone dans les forêts naturelles de Madagascar a été faite par RAZAFIMANDRANTO, 2014.

Tableau 12 : Quantité de Carbone de biomasse de quelques forêts humides de Madagascar

Sites	Altitude (m)	Stock de Carbone (MgC/ha)	Auteurs
Forêt haute littorale de Tampolo	10	55,05	Présente étude
Anbohimandresy (Haut Mangoro)		145	ANDRIAMAHAY, 1995
Andapa Betaolana	400	154,9	HERITOKILALAINA, 2010
Forêt humide de Mandraka	800 à 1 300	164	ANDRIAMAHAY, 1995
Mahatsinjo (Haut Mangoro)	896 à 967	143	ANDRIAMAHAY, 1995
Manompana (dégradée)	10	209,37	RAKOTONDRA SOA, 2009
Manompana (Peu dégradée)	10	308,5	RAKOTONDRA SOA, 2009
Ranomafana	400 à 800	205,8	RARIVOMANANA, 2008
Ranomafana	800 à 1 200	182,2	RARIVOMANANA, 2008
Ranomafana	1 200 à 1 400	99,4	RARIVOMANANA, 2008
RS Analamazaotra	930 à 1 100	169,5	RAZAFIMANDRANTO, 2014

Source : RAZAFIMANDRANTO, 2014

La valeur du Stock de Carbone de la forêt haute littorale de Tampolo obtenue dans la présente étude (55,05 MgC/Ha) est largement inférieure à celle des écosystèmes forestiers illustrés ci-dessus. La forêt littorale de Manompana à 10 mètres d'altitude (même altitude que Tampolo) stocke le plus de carbone avec 308,5 MgC/Ha (RAKOTONDRA SOA, 2009) tandis que la forêt d'altitude de Ranomafana (1 200 à 1 400m) conserve 99,4 MgC/Ha (RARIVOMANANA, 2008). Il est observé alors que les Stocks de Carbone des forêts humides orientales de Madagascar varient suivant l'altitude. Ces Stocks diminuent en fonction de la montée en altitude. Cependant, les résultats obtenus dans ce travail ne suivent pas cette logique mais ils sont comparables aux Stocks de Carbone de la forêt sèche de Tsimanampetsotsa avec 49,45 MgC/ Ha (BALDAUF et *al.*, 2010) en utilisant la méthode de récolte intégrale. Ces différences sont dues aux structures de chaque forêt, aux divers paramètres dendrométriques du peuplement forestier et principalement sur les différentes méthodologies appliquées notamment sur les équations de régressions et sur les variables mises en jeu dans l'équation qui minimisent l'estimation dans le cas de la présente étude. Il est toujours à signaler que l'adoption de trois paramètres dans l'équation augmente la fiabilité des estimations.

- ✓ Stock de Carbone à l'échelle mondiale

La confrontation des résultats obtenus avec les Stocks de Carbone des régions du monde publiés par WHO Global Forest Ressources Assessment, 2005 utilisant une méthode similaire que celle adoptée a montré l'importance de la forêt haute littorale de Tampolo en termes de stockage de Carbone (55,05 MgC/Ha).

Tableau 13 : Stocks de carbone des forêts des différentes régions dans le monde

Région / Continent	Carbone* (Mg/ Ha)
Présente étude	55,05
Est et Sud de l'Afrique	63,5
Nord de l'Amérique	26
Ouest et Centre de l'Afrique	155
Afrique	95,8
Est de l'Asie	37
Sud et Sud-Est de l'Asie	77
Ouest et Centre de l'Asie	39,7
Asie	57
Europe	43,9
Nord et Centre de l'Amérique	60,1
Sud de l'Amérique	110
Océanie	55
Monde	71,5

Source : WHO GLOBAL FOREST RESSOURCES ASSESSMENT, 2005

De ce tableau ressort que l'Afrique est le plus grand réservoir de carbone du monde avec 155 MgC/Ha et le Nord de l'Amérique stocke le moindre avec 26 MgC/Ha. Les Stocks de la forêt haute littorale de Tampolo sont très proches de ceux de l'Asie et n'éloignent pas ceux de la moyenne mondiale (71,5 MgC/Ha).

4.1.3. Sur les hypothèses

Hypothèse 1 : La quantité de biomasse aérienne de la forêt haute littorale de Tampolo varie selon les espèces.

Pour la vérification de cette hypothèse, plusieurs indicateurs relatifs aux caractéristiques dendrologiques et structurales des espèces sont pris en compte et également la quantité de biomasse aérienne stockée. Ces paramètres sont principalement le diamètre à 1,30 mètres du sol, la hauteur totale, l'infra-densité

des arbres, l'abondance et la dominance du peuplement. D'après les calculs, il existe une différence significative de quantité de biomasse entre les espèces présentes. La biomasse épigée de la forêt haute littorale de Tampolo est donc fonction de tous ces paramètres. Plus un arbre a de gros diamètre, plus il s'élève en hauteur d'où la biomasse aérienne est importante. De plus, plus un arbre a une infra-densité élevée, plus il est dur et conserve beaucoup de biomasse. Enfin, plus une espèce est dominante, plus le stock de biomasse épigée augmente.

Ainsi, l'hypothèse 1 est vérifiée.

Hypothèse 2 : La quantité de la biomasse aérienne de la forêt haute littorale de Tampolo ainsi que son stock de carbone diffèrent selon les strates.

Pour cette seconde hypothèse, après avoir analysé verticalement le peuplement, il est possible de le grouper en trois strates distinctes suivant des classes de hauteurs. D'après les différents calculs encore, l'ensemble d'arbres entre 8 et 14 mètres de hauteur constituant la strate intermédiaire stocke la plus grande quantité de carbone et de biomasse. Cette classe est suivie par la strate inférieure avec les arbres ayant moins de 8 mètres de hauteur avec un stock de carbone et de biomasse moyen. Et enfin la strate supérieure constituée par les arbres de plus de 14 mètres de hauteur est la minime réserve de carbone et de biomasse. Après comparaison de ces stocks, une grande différence d'environ 5 à 15 Mg/Ha de biomasse et 3 à 7 MgC/Ha de carbone réside entre chaque strate. Donc les facteurs structuraux du peuplement, les paramètres dendrométriques, les propriétés technologiques de chaque essence et les éventuelles perturbations dans la forêt entrent en jeu dans la quantification.

Ainsi, l'hypothèse 2 est vérifiée.

4.2. Recommandations

4.2.1. Sur l'approche méthodologique

Pour pouvoir affiner la recherche et remédier sur les points faibles de la méthode d'approche, les recommandations suivantes ont été retenues :

- La courbe aire-espèce devrait être élaborée au fur et à mesure durant la phase d'inventaire floristique afin d'acquies l'aire minimale d'échantillonnage correspondante. Elle augmente la fiabilité des données collectées.
- Pour réduire les erreurs éventuelles dans la quantification de la biomasse aérienne, des analyses statistiques de plusieurs équations devraient être faites afin de créer une équation de régression propre à la forêt haute littorale de Tampolo. Dans ce cas, le logiciel statistique R est conseillé du fait qu'il est gratuit et son utilisation est exigée dans la recherche scientifique mondiale. Donc l'étude ne devrait pas se contenter des équations locales existantes mais il faudrait trouver des régressions encore plus précises pour le site.
- Des recherches technologiques sur les essences inventoriées devraient être effectuées pour avoir ses infra-densités exactes.

- Il est fortement conseillé d'utiliser d'autres méthodes dans la quantification de la biomasse comme les méthodes directes et le LIDAR⁶ pour avoir plus de fiabilité des résultats.
- Les biomasses des plantes non ligneuses et les régénérations naturelles devraient aussi être quantifiées car elles pourraient stocker pas mal de Carbone. Donc les seuils des paramètres à mesurer devraient être rectifiés.
- Autres que la biomasse aérienne et le stock de carbone aérien, les stocks dans d'autres réservoirs du site devraient être évalués telle que la biomasse racinaire, la biomasse de la litière, le stock de Carbone du sol et aussi ceux des bois morts pour éviter la sous-estimation.

4.2.2. Recommandations pour les gestionnaires et la population autour de la NAP

Grâce aux stocks de biomasses et de Carbone importants que renferment la forêt haute littorale de Tampolo, les gestionnaires du site sont incités à favoriser et à conserver ces potentiels dans le but d'acquérir des projets de séquestration de carbone. De ce fait, la gestion de la Nouvelle Aire Protégée de Tampolo devrait être axé sur une stricte protection totale pendant le temps où cette forêt retrouve de nouveau un équilibre au niveau du peuplement. Les gestionnaires devraient alors renforcer les programmes générateurs de revenus autour de la Nouvelle Aire Protégée afin de construire des activités économiques alternative aux exploitations forestières. Il faudrait donc :

- Promouvoir de plus en plus l'apiculture car la forêt haute littorale offre une large gamme de plante mellifères.
- Renforcer la pratique de la pisciculture existante pour que la population puisse en bénéficier. Les pêcheurs en mer devraient grouper dans une organisation paysanne pour leur visibilité sur le marché, les partages techniques.
- Promouvoir encore plus les petits élevages comme l'élevage porcin et l'aviculture avec des soutiens techniques et financiers pour que la population trouve une meilleure activité de production soutenable, rentable et indépendante de la forêt.
- Promouvoir l'écotourisme en renforçant les diffusions médiatiques du site à l'échelle nationale et internationale et en réalisant des aménagements écotouristiques sur des points clés du site y compris la valorisation du bord de la mer afin que la population acquière des travaux pérennes dedans.

Dans le contexte de la bioénergie, les débris de bois issus des exploitations illicites qui couvrent la grande partie des layons et qui détruisent actuellement la forêt mériteraient d'être valoriser. La collecte et la transformation en énergie verte ou la vente directe de ces bois morts constitueraient une grande ressource énergétique et en capital pour l'ensemble de la population autour de la Nouvelle Aire Protégée.

⁶ LIDAR ou « Light Detection And Ranging » : télédétection par laser aéroporté, spécifique du programme PHCF dans le cadre de la REDD pour fournir une estimation de la biomasse aérienne avec beaucoup plus de précision (COMITE TECHNIQUE REDD, 2009).

5. CONCLUSION

Le phénomène de dérèglement climatique qui s'apaise sur la planète terre préoccupe la majorité de la population mondiale. Dirigeants, scientifiques et simples citoyens sont tous inclus dans ce contexte de dégradation global de l'environnement. Face à cette situation, Madagascar s'est engagé internationalement en signant des accords sur l'atténuation des effets du changement climatique, sur l'atténuation de la déforestation, sur la conservation des écosystèmes forestiers et dans le développement durable. Parmi ces accords figure les projets REDD et REDD+. Ils visent principalement la réduction des émissions de gaz à effet de serre dues à la déforestation et la dégradation des forêts. De plus, le domaine de l'énergie qui est vitale pour l'humanité semble aussi le plus critiqué dans ces émissions. Face aux besoins incessants des ressources énergétiques dans le monde et l'obligation de réduction de l'emploi abusives des combustibles fossiles, des alternatives sur les ressources renouvelables sont impérativement nécessaires. Les forêts naturelles jouent des rôles indéniables dans cette situation et la quantité de biomasse et les stocks de Carbone qu'elles renferment sont des éléments primordiaux à savoir pour procéder à l'atténuation du réchauffement climatique.

Dans ce sens, une étude sur l'estimation de la quantité de la biomasse aérienne et le Stock de Carbone dans la forêt haute littorale de Tampolo a été réalisée. Pour ce faire, la méthode indirecte basée sur l'utilisation d'une équation allométrique à partir de 2 paramètres dendrométriques et l'infra-densité des arbres a été adoptée. Le travail a été axé sur la biomasse et la teneur en Carbone épigée des espèces et des strates. De ce travail ressort que le peuplement étudié est composé de 57 espèces et 35 familles ligneuses. *Cleistanthus capuronii*, *Homaliun thouarsianum*, *Intsia bijuga*, *Syzigium* et *Protorhus dintimena* contribuent le plus dans la biomasse aérienne avec une totale de 54,92 Mg/Ha. La strate intermédiaire et inférieure détient le plus grand stock avec une totale de 81,70 Mg/Ha de biomasse épigée tandis que la strate supérieure ne conserve que 28,39 Mg/Ha. Ce travail a donc permis de confirmer les deux hypothèses émises après différents calculs et comparaisons. La forêt haute littorale de Tampolo est alors considérée comme un réservoir important tant sur la biomasse qu'en carbone avec un stock total d'environ 110,10 Mg/Ha de biomasse épigée et 55,05 MgC/Ha d'où 66 060 Mg de biomasse et 33 030 MgC sur les 600 hectares de forêt.

Les objectifs de ces études sont donc atteints et les résultats obtenus pourraient bien être servis lors du processus d'adhésion de la Nouvelle Aire protégée de Tampolo dans le projet REDD+. Cependant, les recommandations d'utilisation des autres approches sont à considérer et les gestionnaires du site sont conseillés à préserver et à améliorer les stocks existants pour avoir l'accès au marché carbone contribuant au développement du site cible.

Dans le futur, plusieurs horizons sont ouverts dans cette domaine de la biomasse et stock de carbone mis pour la continuité de l'étude et la pertinence des autres, la question suivante de pose : « quelles méthodes de quantification sont les plus affinées pour quantifier l'ensemble des stocks de Carbone de toutes les forêts littorales sur sable encore existantes à Madagascar et comment sont ces stocks ?

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. ALAMGIR M. & AL-AMIN M. (2008), "Allometric models to estimate biomass organic carbon stock in forest vegetation", *Journal of Forestry Research*, **19** : 101 - 106.
2. ALTIERI M. & PENGUE W. (2006), *GM soybean*, Latin America's new coloniser.
3. ANDRIAMAHAY M.C. (1995), *Cycle du carbone sur les Hauts Plateaux*, ESSA-Forêts.
4. ANDRIAMALALA F., RANAIVOARIMANANA S., RAKOTOMALALA F.A., ROGER E., FARAMALALA M.H., RABARISON H., RAKOTONDRAOMPANA S., RAKOTONIAINA S. & RIERA, B. (2011), *Outil pour la caractérisation des milieux forestiers et de leur diversité végétale*.
5. BALDAUF T., PLUGGE D., RBIBATE A., LEISCHNER B., DIETER M., & KÖHL M. (2010), *Development of a holistic methodology for implementing a REDD-Scheme at the example of Madagascar*, VTI, Hamburg, Work report of the Institute for World Forestry.
6. BASTIEN S., MESSIER C., & PARK A. (2008), *Allocation de la biomasse en plantation d'arbres tropicales : comparaison entre 23 espèces indigènes et exotiques au Panama*, Centre d'étude de la forêt, Quebec, Canada.
7. BASUKI T., VAN LAAKE P.E., SKIDMORE A.K., & HUSSIN Y.A. (2009), *Allometric equations for estimating the aboveground biomass in tropical land Dipterocarp forests*, Forest Ecology and Management.
8. BERNARD R. (1995), "Rôle des perturbations actuelles et passées dans la dynamique et la mosaïque forestière", *Revue Ecologique Terre Vie*, **50** : 209 - 222.
9. BROWN S. (2002), "Measuring carbon in forests : current status and future challenges", *Environnement and Pollution*, 363 - 372.
10. COMITE TECHNIQUE REDD. (2009), *Rapport d'atelier méthodologique sur le mécanisme REDD*.
11. DE GOUVERNAIN R., & SILANDER JR. A.J. (2004), *The natural history of Madagascar*, 103 - 111.
12. FAO. (2018), *La situation dans forêts du monde, Les forêts au service du développement durable*, 10 - 16.
13. GERARD M. (1960), *Etude écologique de la forêt dense à Gilbertiodendron dewevrei dans la région de l'Uele*, Publ, INAEC, Serie Sc, N° 87.
14. GERP. (2008), *Préservation de la biodiversité de Maromizaha*, Rapport Technique, Dossier N° 416, GERP.
15. GIBBS H.K., BROWN S., O'NILES J., & FOLEY J. (2007), "Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks : making RESS a reality", *Environmental Research Letters* **2**.

- 16.GIEC. (2003), *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*, GIEC.
- 17.GIEC. (2006), *Quatrième rapport national du Canada sur le changement climatique*.
- 18.GOODMAN S.M., & RATSIRARSON J. (2005), *Suivi de la biodiversité de la forêt littorale de Tampo*, Série Sciences Biologiques, 1 - 7.
- 19.GOULD S. (1966), "Allometry and size in ontogeny and phylogeny", *Biological Research*, 587 - 640.
- 20.GRACE J.L., JEAN-LOUIS D., JEAN-JOËL L., ACHILLE B., SEBASTIEN B. & ADELIN F. (2016), *Biomasse et stocks de carbone des forêts tropicales africaines* (synthèse bibliographique), Biotechnologie, Agronomie, Social et Environnement, 508-522.
- 21.GREEN G., & SUSSMAN R.W. (1990), "Deforestation history of the eastern rainforest of Madagascar from satellite images", *Science*, **248** : 212 - 215.
- 22.HERITOKILALAINA A. (2010), *Evaluation du stock de carbone de la biomasse végétale et du sol de la forêt du Nord-Est de Madagascar, suivant le niveau de dégradation : cas du corridor forestier de Betaolana Andapa*, Mémoire d'ingénieur, ESSA-Forêts, Université d'Antananarivo.
- 23.HUMBERT H., & COURS-DARNE G. (1965), *Notice de la Carte de Madagascar*, Trav., Sect., SC., Tech., Inst., Pondichéry.
- 24.IPCC. (2007), *World Mitigation of Climate Change chapter 9, Forestry*.
- 25.KETTERINGS Q.M., COE R., VAN NOORDWIJK M., AMBAGAU Y., & PALM C.A. (2001), "Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forest", *Forest Ecology and Management*, **146** : 199 - 209.
- 26.KILIAN J. (1965), *Les formations littorales marines sableuses de côte Est de Madagascar entre Foulpointe et Mahanoro*, Aspects morphologiques et pédologiques, Doc. IRAM - IRAT.
- 27.KOECHLIN J., GUILLAUMET J., & MAURAT P. (1974), *Flore et végétation de Madagascar*.
- 28.KOTTEK M., GRIESER J., BECK C., RUDOLF B., & RUBEL F. (2006), "World Map of the Köppen-Geiger climate classification", *Meteorologische Zeitschrift*, **15**, N°03 : 259 - 263.
- 29.LAMPRECHT H. (1975), "Zusammensetzung und Aufbau tropischer Feuchtwälder", *Holz aktuell*, **H** : 3.
- 30.MANGENOT G. (1959), *Etudes sur les forêts des plaines et plateaux de la Côte d'Ivoire*, Etudes éburnéennes 4, Côte d'Ivoire, Afrique Ouest, 5 - 8.
- 31.MATE. (2008), *Plan d'aménagement évolutif du site de conservation et de développement de Vohimana Madagascar*.

- 32.MEEF. (2017), *Elaboration d'équation allométriques des formations forestières secondaires à dominance de Ravenala madagascariensis et détermination d'un facteur de biomasse des populations arbustives de Savoka jeunes*, Laboratoire de recherches appliquées foresterie - développement - environnement, Antananarivo.
- 33.MFFP QUEBEC. (2016), *Norme d'inventaire écoforestier*, Normes techniques Placettes-échantillons permanentes, 1.
- 34.MORISSETTE J. (2014), *La recherche au centre de foresterie des Laurentides de ressources naturelles Canada : biomasse forestière*.
- 35.RADOSY H.O. (2010), *Contribution dans l'élaboration du plan d'aménagement et de gestion de la Nouvelle Aire Protégée Tampolo Commune d'Ampasina Maningory, district de Fenoarivo-Antsinana, Région Analanjirofo*, Mémoire d'ingénieur, ESSA-Forêts, Université d'Antananarivo.
- 36.RAFILOARAJAONA H. (2006), *Etude de la dynamique de l'espèce Aucoumea klaineana Pierre (BURCERACEA) en vue d'un aménagement sylvicole, cas de la forêt littorale de Tampolo*, Mémoire de DEA, ESSA-Forêts, Université d'Antananarivo .
- 37.RAJOELISON L.G. (1997), *Etude sylvicole de la forêt tropicale Malagasy : exemples de la forêt littorale exploitée de Tampolo (Fenoarivo-Antsinana)*, Série du Département des Eaux et Forêts - Thèse de Doctorat, 19.
- 38.RAKOTO RATSIMBA H. (2011), *Approche multi-scalaire de la déforestation et de la dégradation : Evaluation du stock de carbone dans la forêt dense humide orientale de Madagascar*, Thèse de doctorat en sciences agronomiques, option : Eaux et Forêt, ESSA, Université d'Antananarivo.
- 39.RAKOTONDRAISOA L. (2009), *Etude du stock de carbone de la forêt de Manompana-Nord-est de Madagascar*, Mémoire de D.E.A. en foresterie, développement et environnement, ESSA-Forêt, Université d'Antananarivo.
- 40.RARIVOMANANA H.T. (2008), *Etude du stock de carbone dans le parc national de Ranomafana*, Mémoire de DEA, ESSA-Forêts, Université d'Antananarivo.
- 41.RARIVOSON C. (1989), *Analyse sylvicole d'une forêt littorale exploitée à Tampolo (Fenoarivo-Antsinana)*, Mémoire de fin d'études ESSA-Forêts, Université d'Antananarivo.
- 42.RATSIRARSON J., ANDRIANARIJAONA J.J., ALIJIMY J., & RANAIVONASY J. (2001), *Plan d'aménagement et gestion de la forêt littorale de Tampolo*, ESSA-Forêts, MEF, Antananarivo.
- 43.RAVEN P. (1988), *Our diminishing tropical forests in The current state of biological biodiversity*, E.O. Wilson, Washington: Biodiversity, National Academy Press Washington, 119-122.

44. RAZAFIMANDRANTO, M. (2014), *Etude du Stock de Carbone sur base de paramètres dendrométriques simples : cas de la Réserve Spéciale d'Analamazaotra Madagascar*, Mémoire de diplôme d'études approfondies, Option Foresterie - Développement et environnement, ESSA-Forêts.
45. RAZAFINDRAMANGA M. (1990), *Rapport technique sur l'établissement de la carte de la forêt de Tampolo*, Université d'Antananarivo.
46. RAZAKAMANARIVO R.H. (2005), *Etude du stock de carbone de la forêt dense-sèche - Forêt de Kirindy - Forêt de Menabe central*, Mémoire de DEA en Foresterie, Développement et environnement, ESSA-Forêt, Université d'Antananarivo.
47. REYES G., BROWN S., CHAPMAN J., & LUGO A. E. (1992), *Wood densities of tropical tree species*, General technical report SO-88, USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station, New Orleans, Louisiana, USA.
48. RONDEUX, J. (1993), *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*, Presses agronomiques de Gembloux.
49. SILVER W., OSTERTAG R., & LUGO A. (2000), "The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands", *Restoration Ecology*, **08** : 394 - 407.
50. SMITH P. (2004), *Engineered biological carbon sinks on land, The global cycle : integrating humans, climate and the natural world*.
51. USDOE & USDA. (2005), *Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry : The technical feasibility of a billion ton annual supply*.
52. VIELLEDENT G. (2010), *Prise en main de R, Régression linéaire*, Cirad - Antananarivo, 18 pages.
53. VIELLEDENT. (2011), *A universal approach to estimate biomass and carbon stock in tropical forests using generic allometric models*, Article for Ecological Applications.
54. VIELLEDENT G., VAUDRY R., ANDRIAMANOHISOA S.D., RAKOTONARIVO O.S., RANDRIANASOLO, H. Z., RAZAFINDRABE, H. N., RAKOTOARIVONY B.C., EBELING J., RASAMOELINA M. (2012), "A universal approach to estimate biomass and carbon stock in tropical forest using generic allometric models", *Ecological application*, **22**, N° **02** : 572 - 583.
55. WEST P.W. (2009), *Tree and Forest Measurement*, Springer-Verlag, Berlin, 2ème édition, 47 - 51.
56. WHO GLOBAL FOREST RESOURCES ASSESSMENT. (2005), *Progress towards sustainable forest management*.
57. WILLIAMS, J. (2009), *Protocole de projet sur le carbone forestier et urbain : une norme pour l'admissibilité et l'évaluation des projets de compensation en fixation de carbone d'Arbre Canada*, 1^{ère} version.

Annexes

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Liste floristique des espèces ligneuses inventoriées et leurs infra-densités respectifs.....	II
Annexe 2 : Fiche d'inventaire	V
Annexe 3 : Données climatiques de Fénériver-Est (Moyenne annuelle 2001 – 2015)	VI
Annexe 4 : Composition floristique du peuplement	VII
Annexe 5 : Représentation en photos de la forêt haute littorale de Tampolo	X

ANNEXES

Annexe 1 : Liste floristique des espèces ligneuses inventoriées et leurs infra-densités respectifs

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Famille	Densité à 12 %	Infra-densité (g/cm ³)	Utilités
Hazoambomaintso	<i>Ambavia geraldii</i>	ANNONACEAE		0,61*	Pilier de case
Matrambody	<i>Asteropeia amblyocarpa</i>	ASTEROPEIACEAE	0,97	0,746'''	Pilier de case, fafana
Antombôna	<i>Asteropeia rhopoldes</i>	ASTEROPEIACEAE	0,97	0,746'''	
Fotsidinty	<i>Bosqueia obovata</i>	MORACEAE	0,59	0,442'''	Fafana
Rarà	<i>Brochoneura acuminata</i>	MYRISTICACEAE	0,72	0,456'''	Pilier de case, anti-carie
Hazondahy	<i>Burasaia madagascariensis</i>	MENISPERMACEAE	0,52	0,386'''	Anti-paludisme
Tsifoberavina	<i>Canthium medium</i>	RUBIACEAE		0,61*	Pilier de case
Tsifo	<i>Canthium</i> sp.	RUBIACEAE	1,03	0,794'''	Pilier de case
Tangena	<i>Cerbera venenifera</i>	APOCYNACEAE		0,61*	Anti-lèpre
Sakay ala	<i>Cinnamosma madagascariensis</i>	CANELLACEAE		0,61*	
Lohindry	<i>Cleistanthus capuronii</i>	EUPHORBIACEAE		0,61*	Poteau
Kafe ala	<i>Coffea</i> sp.	RUBIACEAE		0,61*	Pilier de case
Voantsilaky	<i>Cuphocarpus aculeatus</i>	ARALIACEAE	0,58	0,434'''	Fafana
Zahana	<i>Dialium unifoliatum</i>	LEGUMINOSAE	0,79	0,602'''	
Tsilomodotra	<i>Dicoryphe stipulacea</i>	HAMAMELIDACEAE		0,61*	Pilier de case
Hazomafana	<i>Diospyros haplostylis</i>	EBENACEAE	0,99	0,762	Pilier de case, meuble
Hazomainty	<i>Diospyros squamosa</i>	EBENACEAE	0,99	0,762'''	Pilier de case, meuble, décoration

Afotra	<i>Dombeya laurifolia</i>	MALVACEAE		0,61*	
Kesikesika	<i>Draceana reflexa</i>	CONVALLARIACEAE		0,41"	
Aferonakavy	<i>Elaeocarpus alnifolius</i>	ELAEOCARPACEAE		0,61*	Armature, planche
Amaninombilahy	<i>Eremolaena rotundifolia</i>	SARCOLAENACEAE	1,1	0,85'''	Pilier de case
Menahihy	<i>Erythroxylum</i> sp.	RUBIACEAE		0,61*	Pilier de case, fafana
Sadodoko	<i>Gaerineria</i> spp.	RUBIACEAE		0,41"	
Tsitakotralla	<i>Homalium involucreatum</i>	SALICACEAE		0,7"	Pilier de case
Hazombato	<i>Homalium thouarsianum</i>	SALICACEAE	0,99	0,762'''	
Hintsy	<i>Intsia bijuga</i>	FABACEAE	0,84	0,642'''	Pilier de case, meuble
Nantovoasihy	<i>Labramia bojeri</i>	SAPOTACEAE	0,9	0,69'''	Pilier de case, parquet, meuble, mortier et pilon
Vahy	<i>Liane</i>			0,61*	
Tsimahamasatsokina	<i>Memecylon</i> sp.	MELASTOMATACEAE	0,93	0,714'''	Pilier de case
Mongo	Non identifié 5			0,61*	
Dite	Non identifié			0,61*	
Mamoahely	Non identifié 2			0,61*	
Non identifié	Non identifié 3			0,61*	
Tsimierinerina	Non identifié 4			0,61*	
Tsilaitra	<i>Noronhia buxifolia</i>	OLEACEAE	0,84	0,642'''	Pilier de case, anti-sorcellerie
Tafononana	<i>Ocotea</i> sp.	LAURACEAE		0,51"	Rapaka
Maintsondririnina	<i>Olax</i> sp.	OLACACEAE		0,61*	Pilier de case
Hasintoho	<i>Oncostemum elephantipes</i>	MYRSINACEAE		0,61*	Pilier de case
Antohoravina	<i>Phyllarthron articulatum</i>	BIGNONIACEAE		0,61*	Pilier de case, antifatigue

Maimbovitsika	<i>Pittosporum</i> sp.	PITTOSPORACEAE		0,61*	Pilier, bois de chauffe, ophtalmologie
Ombavy	<i>Polyalthia ghesquieriana</i>	ANNONACEAE		0,75"	Pilier de case
Hazombarorana	<i>Protorhus dintimena</i>	ANACARDIACEAE	0,79	0,602'''	
Tavolo	<i>Ravensara acuminata</i>	LAURACEAE		0,59"	Pilier de case, pilier, fafana
Tsifontsoho	<i>Rhodocolea</i> sp.	BIGNONIACEAE		0,61*	Clôture
Voantalanina	<i>Rhotmannia</i> sp.	RUBIACEAE		0,61*	Pilier de case, fafana
Tsiariniarina	<i>Schizolaena</i> spp.	SARCOLAENACEAE		0,61*	Pilier de case
Fanintonakoholahy	<i>Scolopia erythrocarpa</i>	SALICACEAE	0,92	0,706'''	Balais, anti-diarrhée
Nanto	<i>Sideroxylon betsimisarakum</i>	SAPOTACEAE	1,02	0,786'''	Pilier de case, parquet, meuble, mortier et pilon
Hazondronono	<i>Stephanostegia capuronii</i>	APOCYNACEAE	1,03	0,794'''	Poteau
Hazinina	<i>Symphonia fasciculata</i>	CLUSIACEAE	0,79	0,602'''	Fafana
Hazinina an-tanety	<i>Symphonia</i> sp.	CLUSIACEAE		0,61*	Fafana
Hompa	<i>Syzigium pluricymosa</i>	EUPHORBIACEAE	0,82	0,626'''	Pilier de case, anti-sorcellerie
Rotra	<i>Syzigium</i> sp.	EUPHORBIACEAE		0,59"	Pilier, fafana, anti-diarrhée
Ambora	<i>Tambourissa religiosa</i>	MONIMIACEAE	0,65	0,49'''	Pilier de case, antifatigue
Somotrorana	<i>Tinopsis</i> sp.	SAPINDACEAE		0,61'''	Pilier de case
Voapaka	<i>Uapaca</i> sp.	EUPHORBIACEAE	0,8	0,61'''	Lahatra, pirogue
Hazoambo	<i>Xyopia</i> sp.	ANNONACEAE	0,62	0,466'''	Pilier de case

* : valeur générique de l'infra-densité pour l'Afrique selon (GIEC, Quatrième rapport national du Canada sur le changement climatique, 2006), (Reyes, Brown, Chapman, & Lugo, 1992).

'' : infra-densité selon le site de la F.A.O. « Appendix » <http://www.fao.org/3/w4095e/w4095e0c.htm>

''' : infra-densité de l'arbre à partir de la densité à 12% selon l'UFR Sciences et technologies du bois de l'ESSA.

Date : / /

N° placette :

Localisation placette : Parcelle N°.....[illegible]

Annexe 3 : Données climatiques de Fénérive-Est (Moyenne annuelle 2001 – 2015)

Mois	JUIL	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	DEC	JANV	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	Moyenne annuelle
Température moyenne (°C)	18,9	19,2	20,2	22,5	24,8	26,5	26	25,7	24,4	23,4	21,6	19,8	22,75
Précipitation moyenne (mm)	387,6	289,4	194,3	194,2	162,2	396	510,4	389,9	536	243,9	231,7	307,4	320,25

Annexe 4 : Composition floristique du peuplement

1. Composition en espèces

Espèce	N/2000m ²	N/Ha	Fréquence (%)
<i>Draceana reflexa</i>	295	1475	18,09815951
<i>Homalium thouarsianum</i>	163	815	10
<i>Noronhia buxifolia</i>	130	650	7,975460123
<i>Protorhus dintimena</i>	122	610	7,484662577
<i>Coffea</i> sp.	101	505	6,196319018
<i>Memecylon</i> sp.	100	500	6,134969325
<i>Rhodocolea</i> sp.	81	405	4,969325153
<i>Cleistanthus capuronii</i>	80	400	4,90797546
<i>Canthium</i> sp.	68	340	4,171779141
<i>Cryptocaria</i> sp.	57	285	3,496932515
<i>Syzigium</i> sp.	44	220	2,699386503
<i>Asteropeia amblyocarpa</i>	35	175	2,147239264
<i>Diospyros squamosa</i>	34	170	2,085889571
<i>Gaerineria</i> spp.	31	155	1,901840491
<i>Homalium involucratum</i>	27	135	1,656441718
<i>Ocotea</i> sp.	25	125	1,533742331
<i>Brochoneura acuminata</i>	24	120	1,472392638
<i>Eremolaena rotundifolia</i>	20	100	1,226993865
<i>Oncostemum elephantipes</i>	20	100	1,226993865
<i>Stephanostegia capuronii</i>	19	95	1,165644172
<i>Intsia bijuga</i>	17	85	1,042944785
<i>Dyopsis arenarum</i>	12	60	0,736196319
<i>Syzigium pluricymosa</i>	12	60	0,736196319
<i>Tambourissa religiosa</i>	12	60	0,736196319
Inconnue	11	55	0,674846626
<i>Cuphocarpus aculeatus</i>	10	50	0,613496933
<i>Sideroxylon betsimisarakum</i>	10	50	0,613496933
<i>Uapaca</i> sp.	10	50	0,613496933

<i>Polyalthia ghesquieriana</i>	6	30	0,36809816
<i>Scolopia erythrocarpa</i>	6	30	0,36809816
<i>Xyopia</i> sp.	6	30	0,36809816
<i>Cinnamosma madagascariensis</i>	5	25	0,306748466
<i>Rhotmannia</i> sp.	5	25	0,306748466
<i>Asteropeia amblyocarpa</i>	4	20	0,245398773
<i>Bosqueia obovata</i>	3	15	0,18404908
<i>Dombeya laurifolia</i>	3	15	0,18404908
<i>Phyllarthron articulatum</i>	3	15	0,18404908
<i>Burasaia madagascariensis</i>	2	10	0,122699387
<i>Dypsis tsaravoasira</i>	2	10	0,122699387
<i>Ravensara acuminata</i>	2	10	0,122699387
<i>Tina</i> sp.	2	10	0,122699387
<i>Ambavia gerrardii</i>	1	5	0,061349693
<i>Canthium medium</i>	1	5	0,061349693
<i>Cerbera venenifera</i>	1	5	0,061349693
<i>Dialium unifoliatum</i>	1	5	0,061349693
<i>Dicoryphe stipulacea</i>	1	5	0,061349693
<i>Diospyros haplostylis</i>	1	5	0,061349693
<i>Elaeocarpus alnifolius</i>	1	5	0,061349693
<i>Faguetia falcata</i>	1	5	0,061349693
<i>Olax</i> sp.	1	5	0,061349693
<i>Pittosporum</i> sp.	1	5	0,061349693
<i>Symphonia fasciculata</i>	1	5	0,061349693
TOTAL	8150	100	

2. Composition en familles

Famille	N/2000m ²	N/Ha	Fréquence (%)
<i>CONVALLARIACEAE</i>	295	1475	18,09815951
<i>RUBIACEAE</i>	206	1030	12,63803681
<i>SALICACEAE</i>	196	980	12,02453988
<i>EUPHORBIACEAE</i>	146	730	8,957055215
<i>OLEACEAE</i>	130	650	7,975460123
<i>ANACARDIACEAE</i>	123	615	7,54601227
<i>MELASTOMATACEAE</i>	100	500	6,134969325
<i>BIGNONIACEAE</i>	84	420	5,153374233
<i>LAURACEAE</i>	84	420	5,153374233
<i>ASTEROPEIACEAE</i>	39	195	2,392638037
<i>EBENACEAE</i>	35	175	2,147239264
<i>MYRISTICACEAE</i>	24	120	1,472392638
<i>APOCYNACEAE</i>	20	100	1,226993865
<i>SARCOLAENACEAE</i>	20	100	1,226993865
<i>MYRSINACEAE</i>	19	95	1,165644172
<i>FABACEAE</i>	17	85	1,042944785
<i>ARECACEAE</i>	14	70	0,858895706
<i>ANNONACEAE</i>	13	65	0,797546012
<i>MONIMIACEAE</i>	12	60	0,736196319
<i>ARALIACEAE</i>	10	50	0,613496933
<i>SAPOTACEAE</i>	10	50	0,613496933
<i>INCONNUE</i>	8	40	0,490797546
<i>CANELLACEAE</i>	5	25	0,306748466
Inconnues	3	15	0,18404908
<i>MALVACEAE</i>	3	15	0,18404908
<i>MORACEAE</i>	3	15	0,18404908
<i>MENISPERMACEAE</i>	2	10	0,122699387
<i>SAPINDACEAE</i>	2	10	0,122699387
<i>MYRSINACEAE</i>	1	5	0,061349693
<i>CLUSIACEAE</i>	1	5	0,061349693
<i>ELAEOCARPACEAE</i>	1	5	0,061349693
<i>HAMAMELIDACEAE</i>	1	5	0,061349693
<i>LEGUMINOSAE</i>	1	5	0,061349693
<i>OLACACEAE</i>	1	5	0,061349693
<i>PITTOSPORACEAE</i>	1	5	0,061349693
TOTAL	8150	100	

Annexe 5 : Représentation en photos de la forêt haute littorale de Tampolo

Sources :

- Photos 1, 2, 3 et 4 : auteur février - mars 2019
- 5, 6, 7, 8 et 9 : Archive du site janvier 2019

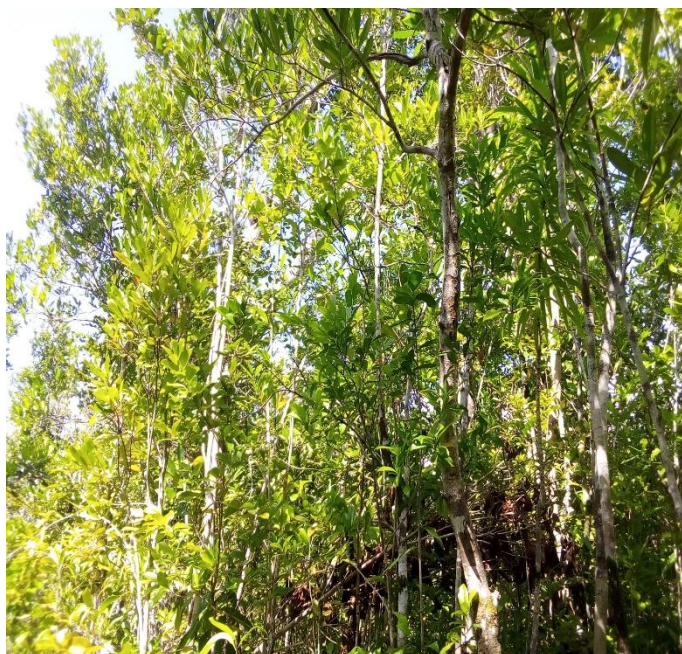


Photo 1 : Forêt haute littorale de Tampolo 1



Photo 2 : Forêt haute littorale de Tampolo 2



Photo 3 : Forêt haute littorale de Tampolo 3



Photo 4 : Layon dans la forêt haute littorale de Tampolo



Photo 5 : Débris d'arbre dans la forêt haute littorale de Tampolo



Photo 6 : Arbre mort dans la forêt haute littorale de Tampolo



Photo 7 : Vue des strates dans la forêt haute littorale de Tampolo



Photo 8 : Pied d'arbre abattu dans la forêt haute littorale de Tampolo



Photo 9 : Souche d'arbre abattu dans la forêt haute littorale de Tampolo