

LISTE DES ACRONYMES

α_i	: Poids
ABG	: Aboveground biomass
ANOVA	: Analysis of variance (analyse de variance)
BA	: Biomasse aérienne
BDD	: Base de données
cm	: Centimètres, 10^{-2} mètres
cm^{-3}	: Centimètres cube, 10^{-6} mètres cube
D12	: Densité du bois mesurée à 12% d'humidité
e	: espèce
ESSA	: Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
F	: Famille
F_i	: Reliquat
G	: Genre
ha	: Hectare
HSD	: High significant difference (différence franchement significative)
ID	: Infradensité
LSD	: Least Significant difference (la plus petite différence significative)
MgC	: Mégagramme de carbone, 10^6 grammes
PgC	: Petagramme de carbone, 10^{15} grammes
PHCF	: Programme Holistique de Conservation des Forêts
ppm	: Parties par million
REDD	: Réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts
US\$: Dollar américain
α	: Seuil de signification (= 0.05)

TABLE DES MATIERES

1	Introduction	1
2	Matériels et méthodes.....	3
2.1	Problématique.....	3
2.2	Hypothèses	4
2.3	Démarche générale	5
2.4	Site d'étude.....	5
2.4.1	Caractéristiques du site.....	5
2.4.2	Caractéristiques des placettes d'inventaire.....	6
2.5	Equation allométrique	7
2.6	Affectation d'une valeur de l'infradensité par espèce	8
2.7	Détermination de l'infradensité selon l'approche 1	8
2.7.1	Sélection des espèces et des individus.....	8
2.7.2	Choix de la forme des éprouvettes pour caractériser l'infradensité d'un arbre	11
2.7.3	Prélèvement des carottes de sondage.....	11
2.7.4	Découpe des carottes obtenues	12
2.7.5	Calcul de l'infradensité.....	12
2.8	Détermination de l'infradensité selon l'approche 2	16
2.9	Détermination de l'infradensité selon l'approche 3	16
2.9.1	Bases de données consultées	16
2.9.2	Procédure d'attribution des valeurs d'infradensité pour chaque espèce.....	17
2.10	Comparaison des valeurs d'infradensité par approche	18
2.11	Estimation de la biomasse aérienne, du stock de carbone et comparaison des approches ...	19
2.12	Expression de ID en fonction de D_{12}	20
2.12.1	Détermination de la densité à 12%.....	20
2.12.2	Expression de ID en fonction de D_{12}	21
3	Résultats	25

3.1	Valeurs d'infradensité par approche.....	25
3.2	Stock de carbone par approche.....	27
3.3	Equation de passage de D_{I2} vers ID	29
4	Discussions.....	32
4.1	Acquis de la recherche.....	32
4.2	Limite de l'étude	33
4.3	Valeurs d'infradensité par espèce calculées dans cette étude.....	33
4.4	Relation entre ID et D_{I2}	34
4.5	Vérification des hypothèses.....	34
5	Conclusion.....	36
6	Références bibliographiques	38

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Liste floristique de la forêt hypothétique.....	10
Tableau 2 : Cadre opératoire de l'étude	24
Tableau 3 : Valeurs de l'infradensité par approche	25
Tableau 4 : Abondance des espèces appartenant au même genre dans la forêt hypothétique.....	27
Tableau 5 : Stock de carbone par approche.....	29
Tableau 6 : Résultats de l'analyse de régression de ID en D_{12}	30
Tableau 7 : Résultats de l'analyse visuelle des résidus	30
Tableau 8 : Equations de régression de ID en fonction de D_{12}	34

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Compartimentation des transects d'inventaire utilisés par Rajaonera.....	7
Figure 2 : Segment circulaire	15
Figure 3 : Diagramme de décision sur l'attribution des valeurs dans l'Approche 3	18
Figure 4 : Schéma méthodologique.....	23
Figure 5 : Stock de carbone de la forêt hypothétique par approche	28
Figure 6 : Diagramme de dispersion et droite d'ajustement de ID en fonction de D_{12}	31
Figure 7 : Graphiques diagnostiques de la régression de ID en fonction de D_{12}	31

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Certains des équipements utilisés	11
Photo 2 : Prélèvement d'une carotte.....	12
Photo 3 : Conditionnement des carottes	12
Photo 4 : Rebouchage du trou après extraction de la carotte.....	12
Photo 5 : Carotte et dispositif de découpe.....	12
Photo 6 : Segments de 1 cm	12
Photo 7 : Saturation des segments	13
Photo 8 : Segments à l'intérieur de l'étuve	13
Photo 9 : Dispositif de mesure des volumes (saturés et à 12%).....	13

LISTE DES EQUATIONS

Equation 1 : Equations de Chave <i>et al.</i> (2005) pour les forêts humides.....	8
Equation 2 : Calcul de l'infradensité par segment.....	13
Equation 3 : Calcul de l'infradensité d'un arbre (moelle au centre).....	14
Equation 4 : Calcul de l'infradensité pour un individu (moelle excentrée).....	15
Equation 5 : Calcul de l'infradensité par espèce.....	15
Equation 6 : Calcul de la biomasse aérienne à l'échelle de la placette.....	19
Equation 7 : Calcul de la densité de biomasse aérienne pour chaque approche.....	19
Equation 8 : Calcul de la densité à 12% pour un segment de 1 cm.....	20
Equation 9 : Calcul de la densité à 12% pour un arbre.....	20
Equation 10 : Equation de la régression de ID en fonction de D_{12}	29
Equation 11 : Equation de régression de ID en fonction de D_{12} , Reyes <i>et al.</i> (1992).....	34
Equation 12 : Expression de ID en fonction de D_{12} , Guilley (2000).....	34

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Localisation des 4 reliquats forestiers.....	I
Annexe 2 : Caractéristiques des placettes d'inventaire.....	I
Annexe 3 : Abondance de chaque espèce de la liste floristique de Rajaonera et celle de la forêt hypothétique.....	II
Annexe 4 : Abondance de chaque espèce de la forêt hypothétique.....	IV
Annexe 5 : Fiche de relevé de données sur terrain.....	V
Annexe 6 : Script de calcul ID avec R.....	VI
Annexe 7 : Résultats des tests de normalité des infradensités pour chaque approche.....	VII
Annexe 8 : Résultats des tests d'égalité des variances des valeurs d'infradensité par approche.....	VII
Annexe 9 : Résultats de l'ANOVA et du test LSD de Fisher sur les valeurs moyennes de l'infradensité selon les 3 approches.....	VII
Annexe 10 : Résultats de l'ANOVA et HSD Tukey sur les stocks de carbone.....	VIII
Annexe 11 : Résultats des tests d'égalité des variances des 3 approches.....	VIII
Annexe 12 : Résultats des tests de normalités des observations à l'intérieur des 3 approches.....	VIII
Annexe 13 : Valeurs de D_{12} obtenues dans cette étude.....	IX
Annexe 14 : Résultats du test de comparaison valeurs D_{12} de cette étude et D_{12} de Rakotovo <i>et al.</i> (2012).....	X
Annexe 15 : Les 14 nouvelles espèces dotées de valeurs d'infradensité et de densité à 12%.....	XI

Annexe 16 : Résultats ANOVA : Données de cette étude vs données de Vieilledent <i>et al.</i> (2012) pour 08 espèces.....	XI
---	----

1

INTRODUCTION

1 Introduction

Les variations de la couverture végétale, du rayonnement solaire, de la concentration de gaz à effet de serre (GES) et d'aérosols dans l'atmosphère modifient le bilan énergétique du système climatique. La concentration croissante de ces gaz à effet de serre (GES), due aux activités anthropiques, explique l'essentiel du réchauffement de la planète observé depuis la fin du 20-ième siècle (Sadourny, 1992 ; Crowley, 2000; GIEC, 2007). Le dioxyde de carbone (CO_2) est le plus important GES d'origine anthropique. Sa concentration atmosphérique en 2005 (379 ppm) dépasse largement les variations naturelles durant les 650 000 dernières années (80–300 ppm). Le changement climatique a déjà des effets mesurables sur de nombreux systèmes naturels et humains (Stern, 2006 ; GIEC, 2007) et les prédictions sont loin d'être encourageantes. Afin d'atteindre l'objectif fixé par la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (C.C.N.U.C.C.), celui de stabiliser les concentrations de GES dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique (Lescuyer et Locatelli, 1999), il est impératif de retirer les GES excédentaires dans l'atmosphère et de réduire considérablement les sources. A ce titre, les forêts jouent un rôle important et notamment les forêts tropicales en raison de l'ampleur des transformations anthropiques dont elles sont l'objet, de la quantité de carbone qu'elles contiennent par unité de surface et enfin, parce qu'elles ont la capacité de séquestrer des quantités importantes de carbone atmosphérique (Lescuyer et Locatelli, 1999 ; Luyssaert *et al.* 2008 ; Canadell and Raupach, 2008 ; Pan *et al.* 2011).

Selon Pan *et al.* (2011), la quantité de carbone stocké par les forêts du monde est estimée à 861 ± 66 Pg C, tout compartiment considéré, dont 55% (471 ± 93 Pg) se trouve dans les forêts tropicales. Pour le compartiment « biomasse aérienne », Saatchi *et al.* (2011) et Baccini *et al.* (2012) rapportent, pour les forêts tropicales, un stock actuel de 247 Pg C et 228,7 Pg C respectivement. En termes de séquestration, les forêts tropicales ont absorbé $2,7 \pm 0,7$ Pg C par an sur la période 2000-2007 (Pan *et al.* 2011). Toutefois, la déforestation et la dégradation des forêts impactent sur le potentiel futur des forêts à retirer le carbone additionnel de l'atmosphère (Chave *et al.* 2008, Saatchi *et al.* 2011). La contribution relative de la déforestation et de la dégradation des forêts tropicales dans les émissions totales de CO_2 d'origine anthropique était de 20% dans les années 90 (GIEC, 2007), puis revue à la baisse en 2008, à $12\% \pm 6\%$ selon le taux de déforestation (van der Werf *et al.* 2009). Les émissions nettes de carbone dues à la déforestation tropicale et à l'utilisation des sols se chiffrent à 1.0 Pg de C par an sur la période 2000-2010 (Baccini *et al.* 2012 ; Zarin, 2012) et 0.8 ± 0.3 Pg C par an sur la période 2000-2005 (Harris *et al.* 2012).

Pour réduire les 12% à 20% d'émissions de CO_2 issues des forêts, une nouvelle approche de conservation a été créée en 2007. C'est le mécanisme REDD, acronyme pour Réduction des émissions

dues à la déforestation et à la dégradation des forêts. La REDD se caractérise par l'établissement d'un lien direct entre les incitations financières à la conservation et le carbone stocké dans la forêt (Ebeling and Yasue, 2008 ; Kindermann *et al.* 2008). Le champ d'activités de la REDD s'est beaucoup élargi depuis sa création (Agrawal, Nepstad and Chharte, 2001). Cet élargissement a été effectué afin de permettre à un plus grand nombre de pays de participer et parce que l'enjeu de la conservation des forêts tropicales n'est pas juste climatique (Harvey, Dickson and Kormos, 2009). Afin de générer des bénéfices à partir de REDD, les Etats doivent concevoir un système efficace de mesure, de rapportage et de vérification (MRV) des stocks de carbone (Plugge *et al.* 2011, Herold and Skutsch, 2011). La quantification des émissions de carbone - ou des réductions d'émissions/émissions évitées - requiert des informations sur le taux de déforestation et sur les stocks de carbone (IPCC, 2003 ; Houghton, 2005 ; Gibbs *et al.* 2007) à un moment donné. En matière de REDD, c'est l'estimation du carbone contenu dans la biomasse aérienne qui est l'approche de suivi des stocks le plus pragmatique (Plugge *et al.* 2011).

La biomasse aérienne est couramment quantifiée à partir d'équations allométriques. Certaines de ces équations incorporent trois variables qui sont le diamètre à 1.30 m, la hauteur totale et l'infradensité du bois. L'infradensité est considérée comme une variable importante dans l'estimation de la biomasse aérienne. La contrainte qui se pose pour ce cas est la déficience relative en données sur cette variable pour les essences malagasy. Par ailleurs, l'infradensité n'est pas un facteur constant mais dépend entre autres de l'essence, du tempérament de l'essence, de la fertilité du sol, des conditions environnementales (Fearnside, 1997 ; Williamson and Wiemann, 2002; Baker *et al.* 2004 ; Muller-Landau, 2004). Bien que des bases de données existent, il y a lieu de se demander si le stock de carbone obtenu à partir de valeurs locales d'infradensité est significativement différent du stock de carbone calculé sur la base de valeurs de l'infradensité issues des bases de données. Les valeurs d'infradensité locales se comprennent ici comme étant des valeurs déterminées à partir de carottes de sondage prélevées sur des arbres appartenant à la forêt d'étude. L'hypothèse principale avancée est que les stocks calculés à partir de ces données, selon leur origine, sont significativement différents. Afin de vérifier cette hypothèse, cette étude a défini deux approches générales qui se distinguent fondamentalement par l'origine des valeurs de l'infradensité utilisées dans l'estimation du stock de carbone. Les différences sur les stocks de carbone observés ont ensuite été comparées statistiquement.

2

MATERIELS ET METHODES

2 Matériels et méthodes

2.1 Problématique

Le mécanisme REDD est vu comme une opportunité pour Madagascar pour gérer durablement ses forêts et pour alléger la paupérisation (Ferguson, 2009). Actuellement REDD-plus (REDD+), son champ d'application porte sur la réduction d'émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts, la protection et la gestion durable des forêts ainsi que la valorisation des stocks de carbone forestier dans les pays en voie de développement (UICN, 2009 ; Herold and Skutsch, 2011). Les projets REDD occupent la deuxième place en termes de part de marché (10%) derrière les projets éoliens sur le marché volontaire du carbone (Peters-Stanley and Hamilton, 2012). Comparées à la séquestration de carbone liée aux plantations d'arbres, les activités d'évitement d'émissions de carbone présentent l'avantage d'avoir des impacts directs et immédiats puisque le stock de C est déjà disponible (Rakoto Ratsimba, 2011). L'estimation du stock du carbone contenu dans la biomasse aérienne (BA) requiert la quantification de celle-ci. Des équations allométriques ont été développées à cette fin. Les directives fournies par le GIEC sur les méthodologies d'évaluation du carbone sont organisées en « tiers », chaque tiers représentant un niveau de précision défini. Dans son niveau III, des méthodes hautes résolutions sont requises, y compris les équations allométriques (Aalde *et al.* 2003 ; IPCC, 2006). D'une manière générale, les bénéfices potentiels issus des crédits carbone seront d'autant plus importants que les méthodologies de suivi du stock et des réductions d'émissions seront précises (Vieilledent *et al.* 2012). La construction de modèles allométriques locaux adaptés aux forêts malagasy allaient dans ce sens (Razakamanarivo, 2005 ; Rakotondrasoa, 2009 ; Andriamanohisoa, 2010 ; Randrianasolo, 2010 ; Rakotonarivo, 2010 ; Razafindrabe, 2010 ; Vieilledent *et al.* 2012). Ils estiment mieux la biomasse aérienne que les modèles génériques de Brown *et al.* (1989), de Brown (1997) et de Chave *et al.* (2005) souvent retenus comme référence. Les plus récents de ces modèles sont ceux élaborés dans le cadre du programme holistique de conservation des forêts malagasy (PHCF¹). Ils intègrent le diamètre à 1.30 m, la hauteur totale de l'arbre et l'infradensité du bois (ID) comme variables prédictrices de la biomasse aérienne (Andriamanohisoa, 2010 ; Randrianasolo, 2010 ; Rakotonarivo, 2010 ; Razafindrabe, 2010, Vieilledent *et al.* 2012). L'importance de l'infradensité comme variable explicative dans l'estimation du stock de carbone a été confirmée par de nombreux auteurs comme Reyes *et al.* 1992 ; Brown, 1997 ; Fearnside, 1997 ; Cornelissen *et al.* 2003 ; Baker *et al.* 2004 ; Nogueira, Nelson and Fearnside, 2005 ; Chave *et al.* 2005, 2009 ; Henry *et al.* 2010 ; Williamson and Wiemann, 2010 ; Vieilledent *et al.* 2012). L'infradensité (ID) d'un échantillon est définie comme le rapport entre sa masse anhydre et son volume saturé, relatif à la

¹ Le PHCF est un projet pilote REDD+ financé par la Fondation GoodPlanet avec comme seul Sponsor la compagnie Air France. Sa mise en œuvre sur le terrain est conjointement assurée par le WWF et GoodPlanet.

masse volumique de l'eau (Williamson and Wiemann, 2010 ; Wiemann and Williamson, 2012). Cette grandeur sans dimension est également connue sous le terme anglais de « basic specific gravity ». Elle constitue une mesure de la quantité de matériaux structurels qu'une espèce d'arbre alloue pour son support et sa solidité (Williamson and Wiemann, 2010).

La contrainte qui se pose aujourd'hui est que les informations sur l'infradensité des bois malagasy sont quasiment inexistantes. Les informations qui ont été publiées, et donc utilisables, sont celles qui ont été déterminées lors des développements des modèles allométriques locaux dans le cadre du PHCF. Cette publication fournit des valeurs de l'infradensité pour 256 espèces et genres des forêts humides et d'une forêt sèche de Madagascar. Par ailleurs, Rakotovao *et al.* (2012) ont publié un ouvrage portant sur les propriétés des bois de 187 espèces commerciales malagasy. Malheureusement, l'infradensité ne figure pas dans cette base de données, seules les densités des bois à 12% d'humidité sont disponibles. Bien que des bases de données internationales sur la densité du bois existent actuellement (Reyes *et al.* 1992 ; Chave *et al.* 2005, 2009 ; Zanne *et al.* 2009), il y a lieu de se demander si des données locales sont nécessaires ou non pour estimer la biomasse aérienne des arbres d'autant plus que le taux d'endémisme pour les arbres malagasy avoisine les 96% (Goodman and Benstead, 2005). En effet, l'infradensité est loin d'être un facteur constant et dépend entre autres de l'essence (Ramanantoandro, 2001 ; Baillères *et al.* 2005), des variations climatiques annuelles (Williamson and Wiemann, 2002) et des facteurs topographiques et écologiques (Fearnside, 1997 ; Wiemann, 1989 ; Baker *et al.* 2004 ; Muller-Landau, 2004). La question qui se pose est alors : *Les estimations du stock de carbone obtenues en utilisant, d'un côté, des données de l'infradensité collectées sur le terrain et de l'autre côté, des données tirées des bases de données différent-elles significativement ?*

2.2 Hypothèses

Trois hypothèses ont guidé ce travail. La première est qu'« *il y a une différence significative entre les estimations du stock de carbone en utilisant les valeurs de l'infradensité déterminées sur la base d'échantillons de bois prélevés sur terrain et les estimations du stock de carbone obtenues avec des valeurs reportées dans les bases de données internationales* ». En effet, les données collectées sur terrain traduiraient mieux la réalité et donc fourniraient des résultats plus précis comme dans le cas des équations allométriques locales. Cette hypothèse a été éclatée en deux sous hypothèses. La première est que « Les valeurs locales d'infradensité et les valeurs reportées dans les bases de données sont significativement différentes ». La seconde sous hypothèse à vérifier est : « Les stocks de carbone calculés à partir des données locales d'infradensité sont significativement différents des stocks de carbone calculés à partir de données d'infradensité tirées des bases de données ». Il importe en effet de déterminer si les données d'infradensité utilisées sont différentes ou non puis ensuite de déterminer si cette différence a des implications sur les stocks de carbone calculés à partir de ces données.

Répondre à la question de recherche précédemment posée nécessite aussi de connaître s'il faut déterminer des valeurs d'infradensité propres à chaque espèce ou la connaissance de l'infradensité par genre suffit. En effet, dans les études qui ont établis des modèles allométriques locaux, l'infradensité du genre a été utilisée, et non pas celle de l'espèce, dans le but de faciliter les travaux de terrain. Ainsi, la deuxième hypothèse s'énonce comme suit : « *L'infradensité de l'espèce la plus abondante est suffisante pour représenter les infradensités des espèces appartenant au même genre* ».

La troisième hypothèse ne répond pas directement à la question de recherche mais se considère plutôt comme une capitalisation des données sur les densités à 12% de 187 essences de bois malagasy (Rakotovao *et al.* 2012). En effet, cette hypothèse stipule qu'« *il existe un modèle qui permet d'estimer l'infradensité d'une espèce donnée en connaissant sa densité à 12%* ».

2.3 Démarche générale

La démarche générale consiste à attribuer une valeur d'infradensité par espèce. Une fois qu'une valeur de l'ID a été attribuée à chaque espèce, ces valeurs ont été utilisées afin de calculer le stock de carbone forestier à l'aide d'une équation allométrique. Enfin, les stocks de carbone obtenus ont été comparés statistiquement. Cette démarche a donc nécessité un site d'étude, une approche pour affecter la valeur d'infradensité par espèce et un modèle allométrique d'estimation de la biomasse. La synthèse méthodologique de cette étude est reportée à la Figure 4.

2.4 Site d'étude

L'étude a été menée dans la forêt naturelle de Mandraka, station gérée par le Département des Eaux et Forêts de l'ESSA. Cette forêt est rattachée au Fokontany de Mandraka (entre 47°54' - 47°56' Est, entre 18°53' - 18°55' Sud), Commune d'Ambatolaona, Fivondronana de Manjakandriana, Région Analamanga. Le choix de ce site a été motivé par trois raisons : (i) Un inventaire floristique y a été réalisé récemment en 2008 dans le cadre d'un travail de mémoire d'ingénieur de Rajaonera, (ii) Le site est proche de la capitale et dispose d'un dortoir, ce qui est intéressant compte tenu du budget à disposition assez restreint, (iii) Il a été possible de prélever des bois dans la forêt.

La station est située à 67 Km à l'Est de la capitale, Antananarivo, en empruntant la route nationale n° 2 (RN 2). Par ailleurs, ce site fait office de site éducationnel et d'expérimentation pour le Département des Eaux et Forêts. Aucune étude sur l'infradensité du bois n'y a été entreprise à ce jour.

2.4.1 Caractéristiques du site

Etant donné que le Service de la Météorologie d'Ampanjirany ne dispose pas de données récentes sur les éléments climatiques de Mandraka, les informations sur la station forestière retenues ont été celles fournies par Rajoelison *et al.* (2007 ; 2008) - de 1950 à 1990 - et Rajaonera (2008) de

1950 à 1980. Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 2300 mm réparties entre 150.7 à 207 jours. Les mois les plus arrosés vont de décembre à mars avec un maximum enregistré en janvier (342 mm). Il n'y a aucun mois écologiquement sec. La température moyenne annuelle est de 17.5 °C, avec un minimum de 13.7 °C et un maximum de 20.2° C. L'altitude relativement élevée confère également une humidité relative permanente à la région avec une valeur moyenne annuelle de 82,5%. Le climat est de type tropical humide frais avec une forte influence orientale. Le relief est accidenté, caractérisé par des pentes de 50% en général, atteignant par endroit 90% (Rajoelison *et al.* 2007). La végétation naturelle est du type forêt montagnarde humide de l'Est, située entre 800 et 1300 m d'altitude, caractérisée par des feuillages sempervirents, une densité élevée des arbres, une hauteur réduite et une structure pluristratifiée (Rajaonera, 2008). En plus des arbres et arbustes, des espèces de palmiers (*Dypsis sp.*), d'orchidées (*Bulbophyllum* et *Angraecum*) et de fougères dont les fougères arborescentes (*Cyathea sp.*) y sont recensées (Rajoelison *et al.* 2008).

2.4.2 Caractéristiques des placettes d'inventaire

Il a été nécessaire de disposer de données d'inventaire pour le site d'étude parce que l'estimation de la biomasse aérienne se base sur des données sur le diamètre des arbres, leur hauteur et l'infradensité de leur bois. Ce travail s'est basé sur les données de Rajaonera (2008) concernant les noms vernaculaires des arbres, la plupart des noms scientifiques, les familles, le diamètre à 1,30 cm et la hauteur totale dans les placettes d'inventaire.

Selon cette étude, la forêt primaire de Mandraka couvre une superficie totale de 9.91 ha. Elle renferme 73 espèces réparties dans 52 Genres et 42 Familles. Elle est constituée par quatre reliquats forestiers dénommés F1, F2, F3 et F4 (Annexe 1). Dans chacun de ces reliquats, l'inventaire floristique a été réalisé sur un transect de 125 m × 20 m (longueur × largeur), soit une surface de 0.25 ha, réparti en 04 compartiments (Figure 1) ventilés selon des classes de diamètre prédéfinies :

- Placettes de régénérations naturelles (R) : diamètre compris entre 1 cm et 5 cm ;
- Compartiment C (125m × 5m) : diamètre compris entre 5 cm et 15 cm ;
- Compartiment B (125m × 10m) : diamètre compris entre 15 cm et 40cm ;
- Compartiment A (125m × 20m) : diamètre supérieur à 40 cm.

Les caractéristiques de chaque placette sont présentées en Annexe 2.

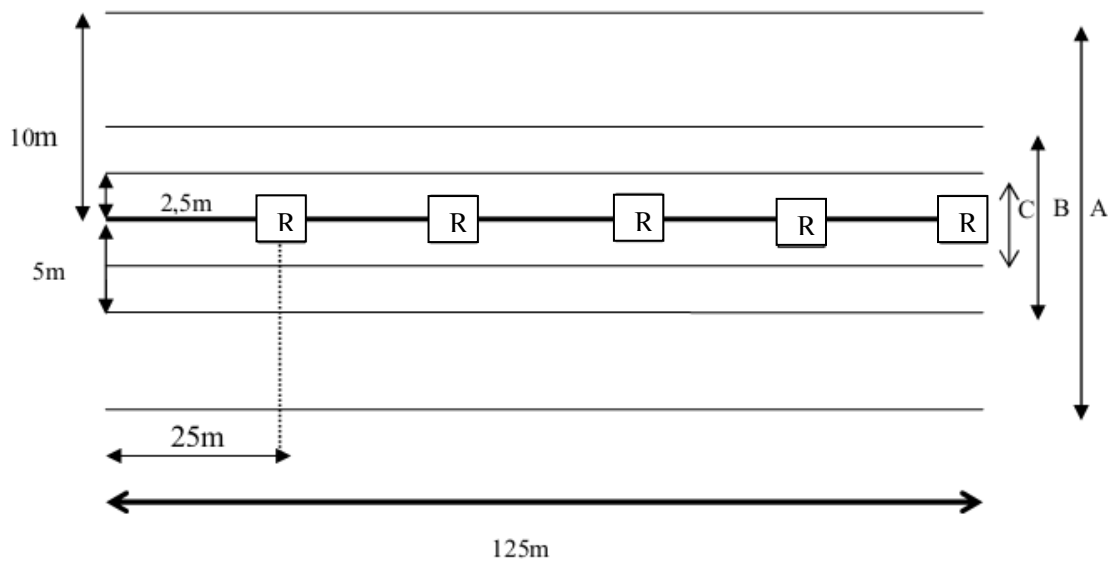


Figure 1 : Compartimentation des transects d'inventaire utilisés par Rajaonera

2.5 Equation allométrique

Le choix d'un modèle est une étape cruciale. En effet, selon Chave *et al.* (2004), la plus importante source d'erreur dans l'estimation de la biomasse aérienne lui est associée. Les modèles locaux sont préférés aux modèles standards internationaux (Vieilledent *et al.* 2012) puisque les arbres sont supposés présenter différentes relations allométriques d'une région à une autre en fonction des facteurs environnementaux (sol et climat entre autres) et des traits fonctionnels des espèces (densité du bois, architecture de la couronne entre autres) (Razafindrabe, 2010 ; Vieilledent *et al.* 2010). Toutefois, il n'y a pas d'équation allométrique disponible pour la forêt naturelle de Mandraka. En pareil cas, Vieilledent *et al.* (2012) proposent l'équation de Chave *et al.* (2005) comprenant le diamètre, la hauteur totale et l'infradensité du bois. Etant donné les conditions climatiques du site d'étude, c'est l'équation pour les forêts humides (Equation 1) qui a été utilisée pour la prédiction de la biomasse aérienne. En effet, cette équation donne une estimation de la biomasse aérienne comparable à celle obtenue avec les équations allométriques locales. Par ailleurs, négliger la hauteur des arbres dans l'estimation de la biomasse conduit à des erreurs importantes dans les résultats d'estimation (Chave *et al.* 2005 ; Nogueira *et al.* 2008 ; Scaranello *et al.* 2011 ; Feldpaush *et al.* 2011, 2012 ; Marshall *et al.* 2012).

$$AGB_{est} = \exp (-2,977 + \ln(\rho D^2 H)) \equiv 0,0509 \times \rho D^2 H$$

Equation 1 : Equation de Chave *et al.* (2005) pour les forêts humides

Avec AGB_{est} : Aboveground biomass estimate , kilograms
 D : Diameter at breast height, centimetres
 H : Total tree height, metres
 ρ : Wood specific gravity, unitless

2.6 Affectation d'une valeur de l'infradensité par espèce

Trois approches ont été testées pour attribuer une valeur d'infradensité par espèce. La première approche, dénommée *Approche 1*, consistait à attribuer à chaque espèce recensée une valeur de l'infradensité (ID). Toutefois, devant la quantité de travail qu'implique cette première approche, une deuxième approche a été envisagée. Dans l'*Approche 2*, les espèces du même genre se sont vues attribuer comme valeur de l'ID celle de l'espèce la plus abondante. Dans ces deux premières approches, les valeurs de l'infradensité utilisées ont été déterminées à partir d'échantillons de bois prélevés sur des arbres de la forêt d'étude puis traités en laboratoire. Enfin, dans la troisième approche, *Approche 3*, les valeurs de l'ID attribuées à chaque espèce provenaient des bases de données existantes.

2.7 Détermination de l'infradensité selon l'approche 1

2.7.1 Sélection des espèces et des individus

Seuls les arbres et arbustes de diamètre supérieur à 5cm ont été considérés. Ils représentent 96% des espèces recensées par Rajaonera. Sur la base de la liste floristique établie par Rajaonera, comptant 70 espèces, l'ambition a été de d'obtenir des carottes sur toutes les espèces à raison de 5 individus par espèce au minimum, 10 étant l'effectif recommandé (Cornelissen *et al.* 2003). Toutefois, au terme des travaux de terrain réalisés en juillet et août 2012, cette ambition d'obtenir des carottes sur toutes les espèces recensées avec les effectifs recommandés n'a pas été réalisée. Certaines espèces n'ont pas été rencontrées tandis que sur d'autres, seule une ou deux carottes ont été obtenues, des effectifs jugés inadéquats (Williamson and Wiemann, 2010). Par conséquent, pour les besoins de l'étude nous étions contraints de construire une forêt à composition floristique hypothétique.

Cette forêt est composée par les espèces sur lesquelles au moins 03 carottes de sondage ont pu être prélevées. La forêt hypothétique est ainsi constituée de 44 espèces d'arbres et d'arbustes, réparties dans 35 genres et 33 familles (Tableau 1) soit 30 espèces de moins que celle de Rajaonera (73 espèces, 52 genres et 42 familles tout type biologique confondu). Il importe toutefois de

mentionner que les espèces abondantes recensées² par Rajaonera figurent dans la forêt hypothétique à l'exception de *Vaccinium sp.* En se basant sur l'abondance de chacune des espèces recensées, la forêt hypothétique représente 78% de la forêt naturelle de Mandraka (Annexe 3). La composition floristique de chaque placette représentative de chacun des reliquats a été de ce fait adaptée à cette nouvelle donne, mais en gardant les valeurs pour le diamètre et la hauteur correspondant à chacun des arbres inventoriés. C'est sur la base de cette forêt hypothétique que la biomasse aérienne et le stock de carbone ont été calculés. La correspondance entre noms vernaculaires et noms scientifiques a été établie sur la base des travaux de Rajaonera. Toutefois, les noms scientifiques pour 04 espèces (*Felamborona*, *Hafomerika*, *Hafombintanina* et *Mongolahy*) n'étaient pas reportés. Leurs noms scientifiques ont été obtenus sur la base d'herbiers que nous avons prélevés et fournis pour identification par le Parc botanique et zoologique de Tsimbazaza (PBZT). Les noms des auteurs proviennent de la base de données Tropicos (MBG, 2010). En outre, le calcul de l'abondance de chaque espèce, une information nécessaire dans l'approche 2, a été également effectué sur la base de cette forêt hypothétique (Annexe 4).

Les prélèvements d'échantillons de bois ont été effectués sur des individus sains, c'est-à-dire ne présentant ni creux ni pourriture à l'intérieur de leur tronc. Ces individus ont été choisis au hasard, indépendamment de leur diamètre, en empruntant les layons existants. Les noms vernaculaires des espèces ont été fournis par un guide local, puis confirmés par des prélèvements d'herbiers, pour les espèces les plus difficiles à identifier. Avant chaque extraction, les informations suivantes ont été enregistrées sur une fiche de collecte de données : la date de prélèvement, les coordonnées géographiques du point de station du groupe électrogène, le numéro de l'arbre, son nom vernaculaire et son diamètre à 1.30 m (Annexe 5). Les signes (*) et (**) dans le Tableau 1 signifient *madagascariensis* et *var. lucidopsis* respectivement. *** indique que ces noms scientifiques proviennent du PBZT.

² Ces espèces sont *Albizzia gummifera*, *Anthocleista madagascariensis*, *Dombeya lucida var lucidopsis*, *Eugenia jambolana*, *Ilex mitis*, *Prothorus ditimena*, *Uapaca densifolia*, *Vaccinium sp*

Tableau 1 : Liste floristique de la forêt hypothétique

#	Nom scientifique	Auteurs	Famille	Nom vernaculaire
1	<i>Agauria sp</i>	Agauria (DC.) Benth. & Hook.	Ericaceae	<i>Angavodina</i>
2	<i>Albizia gummifera</i>	(J.F. Gmel.) C.A. Smith	Fabaceae	<i>Volomborona</i>
3	<i>Anthocleista m/sis*</i>	Baker	Gentianaceae	<i>Lendemy</i>
4	<i>Bosqueia danguyana</i>	Leandri	Moraceae	<i>Dipaty</i>
5	<i>Brexiela sp</i>		Celastraceae	<i>Ranga</i>
6	<i>Calophyllum sp</i>	L.	Calophyllaceae	<i>Vintanina</i>
7	<i>Cassinopsis m/sis*</i>	Baillon	Icacinaceae	<i>Fandrianakanga</i>
8	<i>Chrysophyllum boivinianum</i>	(Pierre) Baehni	Sapotaceae	<i>Famelona</i>
9	<i>Dilobeia thouarsii</i>	Roem. & Schult.	Proteaceae	<i>Vivaona</i>
10	<i>Dombeya lucida**</i>	Arènes	Sterculiaceae	<i>Valomena</i>
11	<i>Dombeya laurifolia***</i>	(Bojer) Baillon	Dombeyaceae	<i>Hafombintanina</i>
12	<i>Erythroxylum corymbosum</i>	Boivin ex Baillon	Erythroxylaceae	<i>Hoditrovvy</i>
13	<i>Eugenia emirnensis</i>	Baker	Myrtaceae	<i>Rotra madini-dravina</i>
14	<i>Eugenia jambolana</i>	(L.) Skeels	Myrtaceae	<i>Rotra be ravina</i>
15	<i>Harungana m/sis*</i>	Lamarck ex. Poiret	Hypericaceae	<i>Harongana</i>
16	<i>Helichrysum sp</i>		Asteraceae	<i>Ramanjavona</i>
17	<i>Homalium sp</i>	Jacq.	Salicaceae	<i>Marefolena</i>
18	<i>Ilex mitis</i>	(L.) Radlkofer	Aquifoliaceae	<i>Hazondrano</i>
19	<i>Macaranga sp</i>	Thouars	Euphorbiaceae	<i>Mokaranana</i>
20	<i>Macaranga sphaerophylla</i>	Baker	Euphorbiaceae	<i>Mongolahy</i>
21	<i>Mapouria sp</i>		Rubiaceae	<i>Kafeala</i>
22	<i>Micronychia m/sis*</i>	Oliver	Anacardiaceae	<i>Tsiramiramy</i>
23	<i>Mussaenda sp</i>	Linnaeus	Rubiaceae	<i>Fatora</i>
24	<i>Nesogordonia sp***</i>	Baillon	Malvaceae	<i>Hafomerika</i>
25	<i>Nuxia capitata</i>	Baker	Stilbaceae	<i>Valanirana</i>
26	<i>Ochrocarpus parvifolius</i>	Elliot	Clusiaceae	<i>Kija</i>
27	<i>Ocotea sp1</i>	Aubl.	Lauraceae	<i>Varongy fotsy</i>
28	<i>Ocotea sp2</i>	Aubl.	Lauraceae	<i>Varongy mainty</i>
29	<i>Ocotea sp3</i>	Aubl.	Lauraceae	<i>Varongy mavokely</i>
30	<i>Ocotea sp4</i>	Aubl.	Lauraceae	<i>Varongy ravimanga</i>
31	<i>Oncostemum sp</i>	A. Juss.	Primulaceae	<i>Hazotoho</i>
32	<i>Pittosporum verticillatum</i>	Bojer	Pittosporaceae	<i>Ambovitsika</i>
33	<i>Protorhus ditimena</i>	H. Perrier	Anacardiaceae	<i>Ditimena</i>
34	<i>Ravensara acuminata</i>	(Willd. ex Meisn.) Baillon	Lauraceae	<i>Tavolopika</i>
35	<i>Ravensara crassifolia</i>	(Baker) Danguy	Lauraceae	<i>Tavolomalama</i>
36	<i>Ravensara sp</i>		Lauraceae	<i>Tavolo ravingoavy</i>
37	<i>Schefflera sp</i>	J.R. Forst. & G. Forst	Araliaceae	<i>Voantsilamboanjo</i>
38	<i>Schefflera voantsilana</i>	(Baker) Bernardi	Araliaceae	<i>Voantsilambato</i>
39	<i>Tambourissa m/sis*</i>	Cavaco	Monimiaceae	<i>Ambora</i>
40	<i>Tina sp***</i>		Sapindaceae	<i>Felamborana</i>
41	<i>Trema orientalis</i>	(L.) Blume	Cannabaceae	<i>Andrarezina</i>
42	<i>Uapaca densifolia</i>	Baker	Uapacaceae	<i>Voapaka</i>
43	<i>Weinmannia minutiflora</i>	Baker	Cunoniaceae	<i>Lalona</i>
44	<i>Zanthoxylum tsihanihimposa</i>	H. Perrier	Rutaceae	<i>Tsilomposa</i>

2.7.2 Choix de la forme des éprouvettes pour caractériser l'infradensité d'un arbre

L'infradensité varie radialement de la moelle à l'écorce. Ces variations peuvent être importantes ou légères, dépendant de l'espèce, du tempérament de l'espèce, de la fertilité du sol, de l'âge, du diamètre ou d'autres facteurs non encore connus (Wiemann and Williamson, 1988, 1989a, 1989b ; De Castro, Williamson and De Jesus, 1993 ; Parolin, 2002 ; Woodcock and Shier, 2003 ; Williamson and Wiemann, 2010). Etant donné la variation radiale de l'infradensité, le moyen de caractériser l'infradensité d'un tronc nécessite le prélèvement soit d'un disque de bois soit d'une carotte complète de la moelle à l'écorce (Williamson and Wiemann, 2010). Pour ne pas abattre les arbres, l'infradensité de chaque arbre sur pied a été estimée par une méthode non destructive, à partir de carottes prélevées à l'aide d'une tarière électrique alimentée par un groupe électrogène (Photo 1B). Cet équipement est constitué d'une perceuse électrique, d'un fil-rallonge (Photo 1A) et d'une mèche de 46 cm de long et de 15 mm de diamètre interne (Photo 1B). Le diamètre à 1.30 m des arbres sur lesquels ont été prélevées les carottes a été mesuré avec un ruban dendrométrique. Les coordonnées géographiques des points de station ont été enregistrées à l'aide d'un GPS.



A : Rallonge électrique



B : Tarière et groupe électrogène

Photo 1 : Certains des équipements utilisés

2.7.3 Prélèvement des carottes de sondage

Une fois la tarière assemblée, la mèche a été positionnée perpendiculairement à l'axe du tronc, à une hauteur comprise entre 100 et 130 cm du sol et dirigée dans le sens de la pente (Photo 2). En raison de la possible existence de bois de tension due à la pente du terrain d'une part (Rakotovololonalimanana, 2010), et pour des raisons d'ordre pratique d'autre part, les carottes devaient s'étendre de l'écorce à l'écorce. Chaque carotte a été placée dans un sachet hermétique jusqu'à leur arrivée au laboratoire pour minimiser la perte d'humidité (Photo 3). Chaque trou a été ensuite rebouché à l'aide de tiges de bois afin de limiter les attaques biologiques sur l'arbre (Photo 4).



Photo 2 : Prélèvement d'une carotte



Photo 3 : Conditionnement des carottes



Photo 4 : Rebouchage du trou après extraction de la carotte

2.7.4 Découpe des carottes obtenues

Afin de tenir compte de la variation radiale de l'infradensité, chaque carotte a été découpée, à l'aide d'un dispositif conçu à cet effet (Photo 5), en segments de 1 cm (Photo 6) en partant de 0.5 cm de part et d'autre de la moelle. Les segments contenant l'écorce et la moelle ont été exclus (Williamson and Wiemann, 2010).



Photo 5 : Carotte et dispositif de découpe



Photo 6 : Segments de 1 cm

2.7.5 Calcul de l'infradensité

a) Pour un segment de 1cm

Par définition, l'infradensité du segment i est le rapport entre sa masse anhydre, M_{a_i} (g) et son volume saturé V_{s_i} (cm³), relatif à la masse volumique de l'eau (Equation 2).

$$\rho_i = \frac{M_{a_i} / V_{s_i}}{\rho_{eau}}$$

Equation 2 : Calcul de l'infradensité par segment

L'état saturé a été obtenu en plaçant les segments dans un récipient rempli d'eau durant 5 à 7 jours (Photo 7). L'état anhydre a été obtenu en plaçant les éprouvettes dans une étuve à 103°C (Photo 8) jusqu'à obtention d'une masse constante (Wiemann and Williamson, 2012). La masse a été mesurée à l'aide d'une balance de précision de 0.01 g. Le volume saturé, V_s (cm^3), a été mesuré en utilisant la méthode d'Archimède par déplacement d'eau. Le dispositif de mesure est constitué d'un bécber d'une contenance de 150 ml rempli d'eau du robinet placé sur une balance de précision d'une capacité maximale de 200 g et d'une précision de 0.01 g. L'ensemble bécber-balance est placé au-dessus d'un support. Le maintien en immersion du segment dans l'eau, sans toucher les parois du bécber, est assuré par un fil de fer muni d'une espèce de réceptacle pendu à un support en bois (Photo 9). L'ensemble bécber-eau-fil de fer étant taré, la masse du segment introduit et immergé correspond à son volume, puisque la masse volumique de l'eau est de 1g.cm^{-3} .

**Photo 7 : Saturation des segments****Photo 8 : Segments à l'intérieur de l'étuve****Photo 9 : Dispositif de mesure des volumes (saturés et à 12%)****b) Pour un arbre**

L'infradensité d'un arbre est égale à la moyenne pondérée des infradensités de chaque segment constitutif de la carotte extraite de cet arbre. Les poids sont constitués par la surface de l'anneau que représente chaque segment (Muller-Landau, 2004 ; Williamson and Wiemann, 2010). En schéma classique, l'infradensité se calcule avec l'Equation 3.

$$WSG = \sum_{n=1 \text{ to } max} \left(\frac{M_n}{V_n} \right) \times (L_n^2 - L_{n-1}^2) / L_{max}^2$$

Source: www.ctfs.si.edu/data///documents/Wood_density_draft.pdf

Equation 3 : Calcul de l'infradensité d'un arbre (moelle au centre)

- WSG* : infradensité de l'arbre où la masse a été mesurée après séchage à l'étuvage jusqu'à masse constante à une température *t*
- n* : un segment quelconque
- M_n* : masse anhydre du segment en grammes
- V_n* : volume saturé du segment *n*, cm³
- L_n* : distance entre le centre de l'arbre et l'extrémité distale du segment *n*, cm
- L_{max}* : rayon de l'arbre, cm

Dans l'Equation 3, la moelle se trouve au centre du cercle formé par la section du tronc. Le calcul de la surface de l'anneau représenté par chaque segment est assimilé à celui d'un cercle. Dans ce cas, une carotte de la moelle à l'écorce suffit. Toutefois, cette formule n'est pas appropriée pour le cas de cette étude parce que les arbres sont situés sur des pentes et donc la moelle est excentrée. Aussi, une autre formule, gardant le même raisonnement, a été développée. Seul le bois normal a été considéré puisque la proportion du bois de tension dans l'arbre est négligeable (Jourez, 1997). Le bois normal est le bois situé du côté aval de la moelle. Il s'agit de procéder au calcul de la surface d'un segment circulaire ou de considérer la portion du bois normal comme une demi-ellipse. Pour cette étude, le calcul de la surface des anneaux respectifs a été assimilé au calcul d'un segment circulaire (Figure 2 et Equation 4). Les calculs ont été effectués avec le logiciel R³i386 2.15.3. Le script de calcul est reporté à l'Annexe 6.

³ www.r-project.org

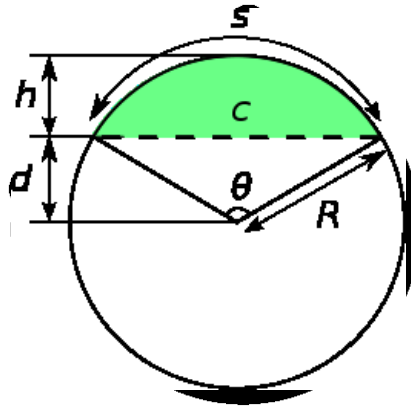


Figure 2 : Segment circulaire

Source : www.wikipedia.fr

$$ID_t = (\sum_{i=1}^n A_{B_i} \times \rho_i) / (\sum_{i=1}^n A_{B_i})$$

Equation 4 : Calcul de l'infradensité pour un individu (moelle excentrée)

ID_t : infradensité de l'arbre t

ρ_i : infradensité du segment B_i

A_{B_i} : surface de l'anneau que représente le segment B_i (segment du côté aval de la carotte), telle que

$$A_{B_i} = A_i - A_{i-1}$$

où

$$A_i = \frac{R_i^2}{2} (\theta_i - \sin \theta_i) \quad : \text{Surface du segment circulaire de rayon } R_i$$

Avec R_i : Distance du segment B_i par rapport à la moelle

θ_i : Angle dépendant de R_i

$$\theta_i = 2 \arccos \frac{d}{R_i}$$

Où \arccos : arccosinus

d : distance entre la moelle et le centre du cercle

c) Pour l'espèce

L'infradensité pour l'espèce est la moyenne arithmétique des infradensités des arbres représentatifs (Equation 5). Ce sont ces valeurs pour l'espèce qui ont été utilisées dans l'équation allométrique d'estimation de la biomasse.

$$ID = \frac{\sum_1^n ID_t}{n}$$

Equation 5 : Calcul de l'infradensité par espèce

Où ID : Infradensité pour l'espèce

ID_t : Infradensité de l'arbre t

n : nombre de carottes prélevées pour une espèce donnée

2.8 Détermination de l'infradensité selon l'approche 2

Pour l'approche 2, la valeur de l'infradensité attribuée à une espèce recensée dans la forêt est l'infradensité de l'espèce la plus abondante appartenant au même genre. En partant du nombre de tiges comptées dans un compartiment donné, l'abondance de chaque espèce a été calculée comme suit :

- Calcul du nombre de pieds à l'échelle de la placette n_{P_i}

$$n_{P_i} = n_{compA} + (2 \times n_{compB}) + (4 \times n_{compC})$$

Où n_{P_i} : nombre de pieds dans la placette P_i , $i = 1$ à 4 car il y a quatre placettes

n_{compA} : nombre de pieds dans le compartiment A

n_{compB} : nombre de pieds dans le compartiment B

n_{compC} : nombre de pieds dans le compartiment C

Les coefficients sont dus à la compartimentation de la placette.

- Calcul de l'abondance dans le reliquat F_i ($i=1$ à 4), A_{F_i} (N/Ha)

$$A_{F_i} = 4 \times n_{P_i}$$

- Calcul de l'abondance à l'échelle de la forêt naturelle toute entière, A_F (N/Ha)

$$A_F = \frac{\sum_1^4 S_{F_i} \times A_{F_i}}{\sum_1^4 S_{F_i}}$$

Où S_{F_i} : surface du reliquat F_i (Annexe 2)

$\sum_1^4 S_{F_i}$: surface totale de la forêt naturelle de Mandraka

2.9 Détermination de l'infradensité selon l'approche 3

2.9.1 Bases de données consultées

Pour rappel, avec l'Approche 3, les valeurs de l'infradensité proviennent de la littérature. Les deux bases de données consultées ont été celle de Vieilledent *et al.* (2012) et celle de la Global Wood Density Database (Zanne *et al.* 2009), dénommées BDD(1) et BDD(2) respectivement. La BDD(1) a été établie dans le cadre de l'élaboration de modèles allométriques locaux d'estimation de la biomasse aérienne pour cinq forêts à Madagascar. En y associant des informations provenant de Rakotovo *et al.* (2012), la BDD(1) regroupe des valeurs de l'infradensité pour 256 espèces et genres d'une forêt sèche épineuse et des forêts humides de Madagascar. La BDD(2) est une compilation des informations provenant de 205 sources du monde entier. Elle reporte des informations sur l'infradensité de 8412 taxons, 1683 genres, 191 Familles de différentes régions du monde (Williamson and Wiemann, 2010).

2.9.2 Procédure d'attribution des valeurs d'infradensité pour chaque espèce

La procédure d'attribution de l'infradensité pour chaque espèce selon la littérature est résumée dans la Figure 3. La procédure débute par rechercher si l'espèce est répertoriée dans BDD(1) (Figure 3). Si tel est le cas, la valeur, pour la forêt humide, qui y est disponible est retenue. Dans le cas contraire, la recherche se poursuit dans BDD(2). Si une correspondance est trouvée, le filtre de sélection est la « Région » c'est-à-dire qu'on retient en priorité les valeurs correspondant aux bois de Madagascar. Si ces dernières n'existent pas, on considère les valeurs pour l'Afrique tropicale puis les autres régions tropicales (Asie du Sud Est, Papouasie Nouvelle Guinée, Australie, Océanie). Si plusieurs valeurs sont disponibles pour une même région, la valeur retenue est la valeur moyenne des valeurs disponibles. C'est l'approche par espèce, notée *e*.

Dans le cas où l'espèce n'est répertoriée dans aucune des deux BDD, le genre est recherché dans BDD(1). La valeur de l'infradensité de l'espèce qui y est disponible est retenue comme étant celle de l'espèce recherchée. Dans le cas où plusieurs espèces existent pour ce genre, la valeur retenue est la moyenne des valeurs disponibles. Si le genre ne se retrouve pas dans BDD(1), on migre vers BDD(2). Le filtre « Région » étant toujours d'application, la valeur retenue est toujours la moyenne des valeurs disponibles, bien que ces valeurs appartiennent à des espèces différentes. C'est l'approche par genre, notée *G*.

Pour les cas où le genre ne figure pas non plus dans aucune des deux bases de données, la valeur retenue pour l'espèce est la moyenne des valeurs existantes pour la famille de rattachement en respectant l'ordre de priorité du filtre « Région » c'est-à-dire Madagascar, sinon Afrique tropicale, sinon autres régions tropicales. C'est l'approche par famille, notée *F*. Les valeurs utilisées pour ce cas de figure proviennent uniquement de BDD(2).

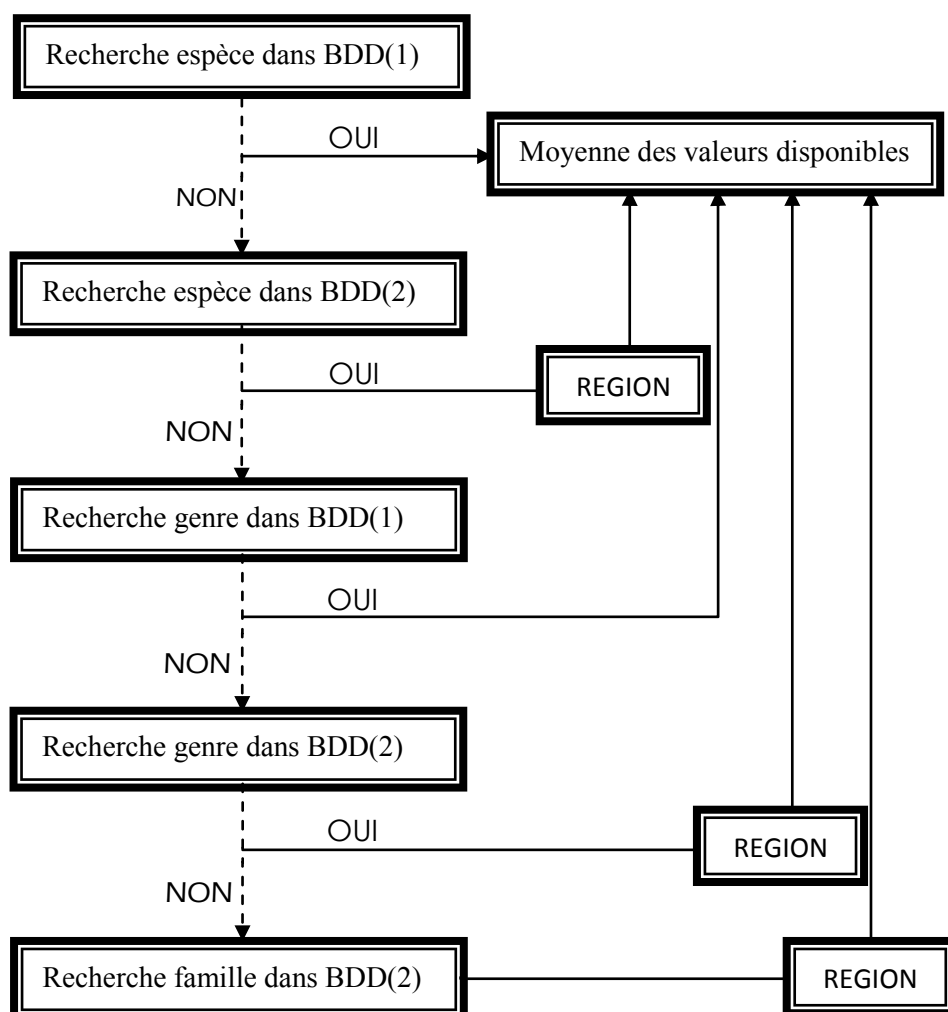


Figure 3 : Diagramme de décision sur l'attribution des valeurs dans l'Approche 3

2.10 Comparaison des valeurs d'infradensité par approche

Une fois les valeurs d'infradensité pour les 44 espèces de la forêt hypothétique obtenues selon les trois approches considérées, leurs moyennes ont été calculées. Une analyse de variance (ANOVA) couplée au test LSD de Fisher a permis de déterminer si les valeurs d'infradensité pour les trois approches sont significativement différentes dans un premier temps et ensuite d'identifier les groupes identiques dans un deuxième temps. Les tests paramétriques sont privilégiés en raison de leur robustesse si les conditions de leur application sont réunies. Le test de Shapiro-Wilk et le test de Levene ont été utilisés pour vérifier la normalité des observations et l'homogénéité des variances de chaque groupe à comparer, respectivement. Dans le cas où les conditions d'application ne sont pas remplies, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis sera utilisé pour la comparaison des 3 moyennes puis le test U de Mann-Whitney pour la comparaison par paires.

2.11 Estimation de la biomasse aérienne, du stock de carbone et comparaison des approches

On part du principe que la biomasse aérienne (BA) dans une surface donnée est égale à la somme des BA des arbres qui s'y trouvent. Or comme la placette a été compartimentée, il faut calculer également la BA dans chaque compartiment puis ramener cette quantité à l'échelle de la placette. Les BA dans chaque compartiment ont été calculées à partir de l'équation allométrique Equation 1. Les valeurs du diamètre et de la hauteur associées à chaque arbre proviennent de Rajaonera (2008). Les valeurs pour l'infradensité diffèrent selon l'approche considérée. La biomasse aérienne à l'échelle de la placette est donnée par l'Equation 6.

$$BA_{P_i} = BA_A + 2 BA_B + 4 BA_C$$

Equation 6 : Calcul de la biomasse aérienne à l'échelle de la placette

Où BA_{P_i} : biomasse aérienne contenue dans la placette P_i ($i = 1$ à 4).
 BA_A : biomasse aérienne calculée dans le compartiment A
 BA_B : biomasse aérienne calculée dans le compartiment B
 BA_C : biomasse aérienne calculée dans le compartiment C

Chaque BA_{P_i} a été par la suite ramenée à l'hectare pour représenter la BA contenue dans le reliquat F_i , notée DBA_{F_i} . DBA_{F_i} est la densité de biomasse pour le reliquat F_i exprimée en tonnes.ha⁻¹. Pour la forêt entière, la BA a été obtenue en calculant la moyenne pondérée des DBA_{F_i} , les poids étant constitués par les surfaces respectives de chaque reliquat (Equation 7).

$$DBA_k = \sum \alpha_i DBA_{F_i}$$

Equation 7 : Calcul de la densité de biomasse aérienne pour chaque approche

Où α_i : rapport entre la surface du reliquat F_i et la surface totale de la forêt
 DBA_{F_i} : densité de biomasse aérienne dans le reliquat F_i
 DBA_k : BA selon les approches $k = 1, 2$ ou 3

Chaque valeur moyenne de BA_k peut être convertie en quantité de carbone, notée C_k en la multipliant par la fraction carbone (tonne de carbone/tonne de matière sèche) retenue pour cette étude et couramment utilisée, qui a été fixée à 0.5 (Brown, 1997 ; IPCC, 2006). Une ANOVA couplée au test HSD de Tukey permet de déterminer si les stocks de carbone estimés, compte tenu des trois approches, sont significativement différents. Si les conditions de normalité et d'égalité des variances requises pour le lancement de l'ANOVA ne sont pas respectées, le test non paramétrique de Kruskal-

Wallis sera utilisé pour la comparaison des 3 moyennes puis le test U de Mann-Whitney pour la comparaison par paires.

2.12 Expression de ID en fonction de D₁₂

2.12.1 Détermination de la densité à 12%

La densité à 12% d'un échantillon, notée D_{12} dans cette étude, est le rapport entre sa masse volumique et la masse volumique de l'eau, qui est de 1 g.cm^{-3} . La masse volumique de l'échantillon s'obtient en divisant sa masse par son volume, tous deux mesurés à 12% d'humidité. Dans l'objectif d'établir une équation de passage de D_{12} à ID , la densité à 12% a été préalablement mesurée sur chaque segment ayant servi à la mesure de l'infradensité par application de l'Equation 8.

$$D_{12} = \frac{\rho_e}{\rho_e}$$

Equation 8 : Calcul de la densité à 12% pour un segment de 1 cm

Où D_{12} : Densité à 12% du segment

ρ_e : Masse volumique de l'eau, g.cm^{-3}

ρ_e : Masse volumique du segment, g.cm^{-3} où

$\rho_e = M/V$ telles que M : masse mesurée à 12% d'humidité, en g

V : volume mesuré à 12% d'humidité, en cm^{-3}

L'humidité à 12% a été obtenue en stabilisant les éprouvettes dans une chambre de stabilisation réglée à 20°C et 65% d'humidité relative (Sallenave, 1955 ; AFNOR, 1985) jusqu'à ce que la masse soit constante. Les mesures de masse et de volume ont été identiques au protocole adopté pour le calcul de l'infradensité.

Puis la densité pour un arbre a été calculée de la même manière que le calcul de l'infradensité (Equation 9) c'est-à-dire la moyenne pondérée des densités de chaque segment constitutif de la carotte, les poids étant constitués par la surface de l'anneau que représente chaque segment.

$$D12_t = (\sum_{i=1}^n A_{B_i} \times D_{12_i}) / (\sum_{i=1}^n A_{B_i})$$

Equation 9 : Calcul de la densité à 12% pour un arbre

2.12.2 Expression de ID en fonction de D_{12}

Les informations de base pour la construction de l'équation de passage sont les valeurs de l'infradensité et de la densité à 12% des arbres échantillons. Dans un premier temps, le nuage de points issu de la projection de ID en fonction de D_{12} a été tracé. La forme de ce nuage permet de déceler le cas échéant la nature de la liaison entre ces deux grandeurs. Enfin, les paramètres de régression de ID en fonction de D_{12} ont été déterminés compte tenu de la nature de la liaison établie. Au vu des travaux de Reyes *et al.* (1992), le modèle linéaire a été privilégié. En effet, Reyes *et al.* (1992) ont établi une relation linéaire entre ID et D_{12} construite à partir des données de Chudnoff (1984) renfermant 379 arbres des régions tropicales d'Amérique, d'Asie et de l'Afrique.

La qualité du modèle a été évaluée à travers la valeur de son coefficient de détermination R^2 et de l'analyse des résidus. Un bon modèle se caractérise par des résidus normalement distribués et non corrélés entre eux (c'est-à-dire qu'il n'y ait pas trop de résidus voisins situés du même côté de la droite, ce qui indiquerait que le nuage de points ne représente pas une droite). L'analyse des résidus peut s'effectuer visuellement au moyen de 04 graphiques dont les interprétations suivantes sont les indicateurs d'un bon ajustement :

- *Graphe fitted vs residus*

On s'attend à une ligne rouge plus ou moins horizontale (pas de tendance dans les résidus) et environ 5% des points en dehors de l'intervalle de confiance de 95% d'une distribution gaussienne.

- *Q-Q plot*

On s'attend à ce que les points suivent approximativement la diagonale en pointillée. Un Q-Q plot en forme de S ou de banane indiquerait que le modèle n'est pas bon.

- *Graphe Scale-location*

Le troisième graphique répète le premier à une autre échelle, traçant la racine carrée des résidus standardisés en fonction des valeurs ajustées. On s'attend à un nuage de points assez homogène avec la ligne rouge suivant la valeur 1. Un nuage de points triangulaire avec beaucoup plus de variabilité d'un côté comparé à l'autre indiquerait un problème du modèle linéaire.

- *Residuals vs Leverage*

Ce quatrième trace la distance de Cook qui est une mesure de l'influence d'une mesure sur l'estimation des paramètres de régression. Des valeurs dans la zone rouge (indiqué par les lignes en trait) identifient des points qui influencent démesurément la valeur des paramètres estimés.

Le diagramme de dispersion, l'estimation des paramètres et l'analyse des résidus ont été réalisés avec le logiciel R.

Le modèle n'est utilisable que s'il est vérifié qu'il n'y a pas de différence significative entre les valeurs de D_{12} reportées par Rakotovao *et al.* (2012) et celles obtenues dans cette étude. Pour ce faire, un test de comparaison de deux moyennes (test t de student) a été effectué pour 24 espèces, au seuil de 5%.

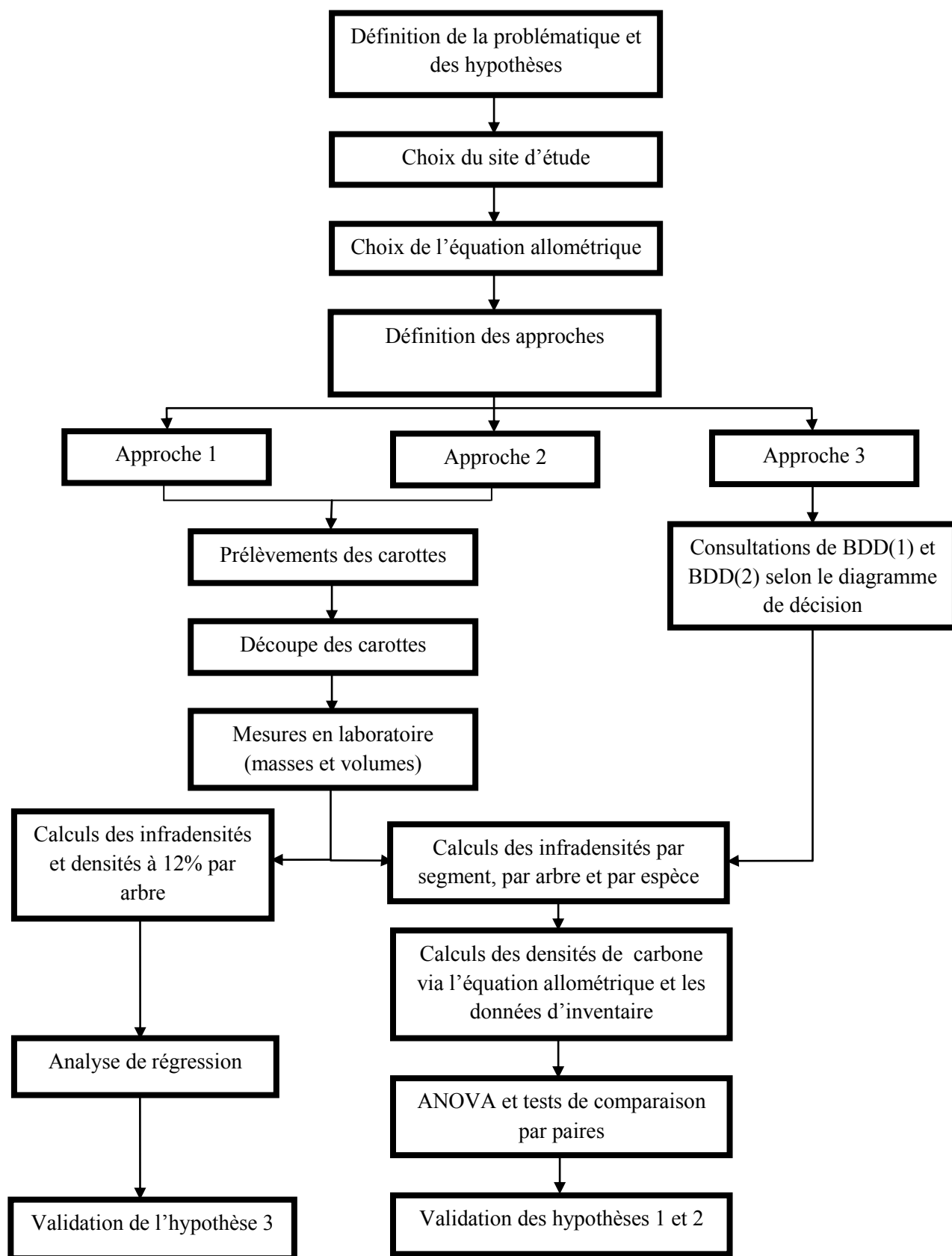


Figure 4 : Schéma méthodologique

Tableau 2 : Cadre opératoire de l'étude

Problématique	Hypothèses	Variables	Indicateurs	Méthodes
Les estimations du stock de carbone obtenues en utilisant, d'un côté, des données de l'infradensité collectées sur le terrain et de l'autre côté, des données tirées des bases de données différent-elles significativement ?	<p>H1 : Il y a une différence significative entre les estimations du stock de carbone en utilisant les valeurs de l'infradensité déterminées sur la base d'échantillons de bois prélevés sur terrain et les estimations du stock de carbone obtenues avec des valeurs reportées dans les bases de données internationales</p> <p>SH1 : Les valeurs d'ID locales sont significativement différentes des valeurs d'ID reportées par les bases de données</p> <p>SH2 : Les stocks de C calculés sur la base de valeurs d'ID d'origine différente sont significativement différents.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Infradensités de chaque espèce - Stock de carbone pour chacune des approches 	<ul style="list-style-type: none"> - p-value au seuil de signification de 0.05 	<ul style="list-style-type: none"> - Choix du site - Choix de l'équation allométrique - Attribution des valeurs de l'infradensité - Calcul des infradensités - Calcul des stocks de C par approche - ANOVA et test de comparaison par paires
	H2 : L'infradensité de l'espèce la plus abondante est suffisante pour représenter les infradensités des espèces appartenant au même genre	<ul style="list-style-type: none"> - Abondance de chaque espèce - Stock de carbone calculé selon l'Approche 1 et l'Approche 2 	<ul style="list-style-type: none"> - p-value au seuil de signification de 0.05 	<ul style="list-style-type: none"> - Comparaison du stock de C moyen calculé selon l'Approche 1 et l'Approche 2 (comparaison par paires du test HSD Tukey)
	H3 : Il existe un modèle qui permet d'estimer l'infradensité d'une espèce donnée en connaissant sa densité à 12%	<ul style="list-style-type: none"> - Infradensités (ID) des arbres - Densité à 12% (D_{12}) des arbres 	<ul style="list-style-type: none"> - Coefficient de détermination R^2 - Analyse des résidus - Paramètres du modèle de Reyes <i>et al.</i> (1992) 	<ul style="list-style-type: none"> - Nuage de points - Analyse de corrélation - Analyse de régression

3

RESULTATS

3 Résultats

3.1 Valeurs d'infradensité par approche

Pour rappel, 3 approches ont été testées dans le cadre de cette étude :

- *Approche 1* : valeur de l'infradensité par espèce déterminée à partir de prélèvements de carottes sur terrain,
- *Approche 2* : idem que *Approche 1* sauf que la valeur de l'infradensité pour les espèces du même genre est celle de l'espèce la plus abondante,
- *Approche 3* : les valeurs de l'infradensité proviennent de BDD(1) et de BDD(2).

Pour les *approches 1* et *2*, 303 carottes de sondage ont été prélevées, découpées puis pesées (Tableau 3). Le nombre de carottes obtenues par espèce varie de 2 à 13 avec une moyenne de 6 à 7 (Tableau 3). Au total, 3250 segments de 1 cm ont été prélevés de ces carottes. L'infradensité mesurée sur les segments varie de 0.180 à 0.892 avec une moyenne de 0.495. Le premier, la médiane et le troisième quartile sont respectivement de 0.406, 0.495 et 0.584. Le tableau 3 récapitule les valeurs d'infradensité par espèce selon chacun des 3 approches étudiées.

Tableau 3 : Valeurs de l'infradensité par approche

Nom scientifique	Approche 1					Approche 2	Approche 3		
	ID	sd	min	max	n	ID	ID	Source	App.
<i>Agauria sp</i>	0,500	0,042	0,451	0,545	4	0,500	0,491	[2]	F
<i>Albizia gummifera</i>	0,410	0,062	0,318	0,517	9	0,410	0,500	[2]	e
<i>Anthocleista m/sis</i>	0,670	0,056	0,594	0,764	6	0,670	0,790	[1]	e
<i>Bosqueia danguyana</i>	0,596	0,032	0,563	0,639	8	0,596	0,499	[2]	e
<i>Brexiela sp</i>	0,746	0,059	0,705	0,864	6	0,746	0,737	[2]	F
<i>Calophyllum sp</i>	0,552	0,032	0,495	0,599	9	0,552	0,670	[2]	e
<i>Cassinopsis m/sis</i>	0,475	0,027	0,448	0,502	3	0,475	0,600	[2]	F
<i>Chrysophyllum boivinianum</i>	0,498	0,022	0,470	0,548	10	0,498	0,540	[1]	e
<i>Dilobeia thouarsii</i>	0,751	0,037	0,689	0,802	9	0,751	0,844	[2]	e
<i>Dombeya lucida</i>	0,496	0,073	0,351	0,584	10	0,496	0,470	[2]	e
<i>Dombeya laurifolia</i>	0,519	0,040	0,471	0,581	6	0,496	0,470	[2]	e
<i>Erythroxylum corymbosum</i>	0,543	0,046	0,489	0,599	7	0,543	0,547	[2]	G
<i>Eugenia emirnensis</i>	0,617	0,044	0,518	0,641	7	0,672	0,560	[1]	e
<i>Eugenia jambolana</i>	0,672	0,051	0,612	0,735	6	0,672	0,722	[2]	G
<i>Harungana m/sis</i>	0,342	0,046	0,254	0,394	13	0,342	0,470	[1]	e
<i>Helichrysum sp</i>	0,443	0,020	0,426	0,472	4	0,443	0,761	[2]	F
<i>Homalium sp</i>	0,488	0,054	0,424	0,575	7	0,488	0,770	[1]	e
<i>Ilex mitis</i>	0,438	0,032	0,391	0,489	11	0,438	0,480	[2]	e
<i>Macaranga sp</i>	0,352	0,046	0,278	0,403	9	0,352	0,410	[1]	G

Suite Tableau 3	Approche 1					Approche 2	Approche 3		
Nom scientifique	ID	sd	min	max	n	ID	ID	Source	App.
<i>Macaranga sphaerophylla</i>	0,345	0,010	0,334	0,357	5	0,352	0,410	[1]	G
<i>Mapouria sp</i>	0,409	0,029	0,383	0,441	3	0,409	0,542	[2]	G
<i>Micronychia m/sis</i>	0,418	0,034	0,359	0,489	10	0,418	0,729	[2]	F
<i>Mussaenda sp</i>	0,370	0,030	0,325	0,417	6	0,370	0,759	[2]	F
<i>Nesogordonia sp</i>	0,383	0,032	0,339	0,412	5	0,383	0,655	[2]	G
<i>Nuxia capitata</i>	0,665	0,025	0,620	0,698	10	0,665	0,661	[2]	G
<i>Ochrocarpus parvifolius</i>	0,563	0,031	0,517	0,601	5	0,563	0,700	[2]	F
<i>Ocotea sp1</i>	0,478	0,017	0,452	0,489	4	0,476	0,522	[2]	G
<i>Ocotea sp2</i>	0,476	0,022	0,454	0,503	6	0,476	0,522	[2]	G
<i>Ocotea sp3</i>	0,455	0,040	0,431	0,502	3	0,476	0,522	[2]	G
<i>Ocotea sp4</i>	0,548	0,068	0,438	0,658	9	0,476	0,522	[2]	G
<i>Oncostemum sp</i>	0,588	0,020	0,570	0,607	4	0,588	0,510	[1]	e
<i>Pittosporum verticillatum</i>	0,512	0,026	0,493	0,531	2	0,512	0,547	[2]	G
<i>Protorhus ditimena</i>	0,501	0,043	0,415	0,570	10	0,501	0,678	[2]	e
<i>Ravensara acuminata</i>	0,600	0,046	0,530	0,674	10	0,548	0,655	[2]	G
<i>Ravensara crassifolia</i>	0,548	0,045	0,485	0,619	11	0,548	0,655	[2]	G
<i>Ravensara sp</i>	0,545	0,061	0,466	0,602	4	0,548	0,655	[2]	G
<i>Schefflera sp</i>	0,394	0,072	0,316	0,564	9	0,413	0,510	[1]	e
<i>Schefflera voantsilana</i>	0,413	0,057	0,339	0,510	10	0,413	0,510	[1]	G
<i>Tambourissa m/sis</i>	0,482	0,030	0,434	0,507	6	0,482	0,510	[1]	G
<i>Tina sp</i>	0,570	0,049	0,508	0,636	5	0,570	0,708	[2]	F
<i>Trema orientalis</i>	0,260	0,022	0,232	0,284	5	0,260	0,330	[2]	e
<i>Uapaca densifolia</i>	0,607	0,073	0,528	0,717	7	0,607	0,642	[2]	e
<i>Weinmannia minutiflora</i>	0,628	0,053	0,576	0,696	4	0,628	0,571	[2]	e
<i>Zanthoxylum tsihanihimposa</i>	0,383	0,026	0,344	0,408	5	0,383	0,510	[2]	e

n : Nombre de carottes prélevées par espèce

[1] : Base de données de Vieilledent et al. (2012)

[2] : Global Wood density database (Zanne et al. 2009)

e, G, F : Type d'approche adopté pour l'attribution des valeurs (Figure 3), respectivement espèce, Genre, Famille

Sur les 44 espèces étudiées, l'infradensité varie de 0.26 (*Trema orientalis*) à 0.75 (*Brexiela sp*) avec une moyenne de 0.506 et un écart –type de 0.11. 60% des valeurs se trouvent dans l'intervalle 0.4-0.6 pour l'approche 1, 66 % pour l'approche 2.

Dans l'approche 3, l'infradensité varie de 0.33 à 0.84, soit une étendue plus élevée que celle rencontrée dans les deux premières approches. La moyenne est de 0.580 avec un écart-type de 0.12. 60% des valeurs se situent dans l'intervalle 0.5-0.7. 77% (34 espèces sur 44) des valeurs attribuées aux espèces étudiées proviennent de la BBD(2) et 23% de BDD(1) (10 espèces sur 44). Sur les 44 espèces,

17 ont une correspondance exacte (e), 19 ont été estimées par le genre et 8 par la famille, les deux bases de données confondues.

Si on compare les valeurs d'infradensité selon les trois approches, les valeurs d'infradensité fournies par les bases de données sont supérieures à celles issues des travaux de terrain (Tableau 3). L'analyse de variance réalisée sur ExcelStat2008 suivie du test LSD de Fisher (Annexe 7, Annexe 8 et Annexe 9) montre que la moyenne des valeurs de l'infradensité des espèces dans l'approche 3 est significativement différente des moyennes observées dans les deux premières approches ($p = 0.001$, $ddl = 129$, $\alpha = 0.05$). Les différences les plus notables sont celles où l'infradensité a été estimée par l'approche famille (Tableau 3). Pour *Nesogordonia sp* par exemple, l'écart est quasiment double.

Pour l'approche 2, six genres renferment plus d'une espèce. Les valeurs de l'infradensité retenue pour les espèces appartenant à ces genres sont celles de l'espèce la plus abondante (en gras dans Tableau 4).

Tableau 4 : Abondance des espèces appartenant au même genre dans la forêt hypothétique

Genre	espèce	Abondance (N/Ha)
Dombeya	<i>D. lucida</i>	78.95
	<i>D. laurifolia</i>	14.6
Eugenia	<i>E. jambolana</i>	144.11
	<i>E. emirnsensis</i>	48.41
Macaranga	<i>M. sphaerophylla</i>	5.49
	<i>M. cuspidata</i>	60.57
Ocotea	<i>O. sp1</i>	4.24
	<i>O. sp2</i>	8.24
	<i>O. sp3</i>	2.60
Ravensara	<i>R. crassifolia</i>	51.21
	<i>R. acuminata</i>	26.89
	<i>R. sp1</i>	29.06
Schefflera	<i>S. voantsilana</i>	27.38
	<i>S. sp1</i>	11.38

3.2 Stock de carbone par approche

Les stocks moyens de carbone calculés sur la base des valeurs d'infradensité par espèce du Tableau 3 sont respectivement de $36.8 \pm 6.56 \text{ MgC.ha}^{-1}$, $36.8 \pm 6.56 \text{ MgC.ha}^{-1}$ et $41.71 \pm 7.45 \text{ MgC.ha}^{-1}$ pour les approches 1, 2 et 3 (Figure 5). Ces valeurs ont été obtenues après application de l'Equation 7.

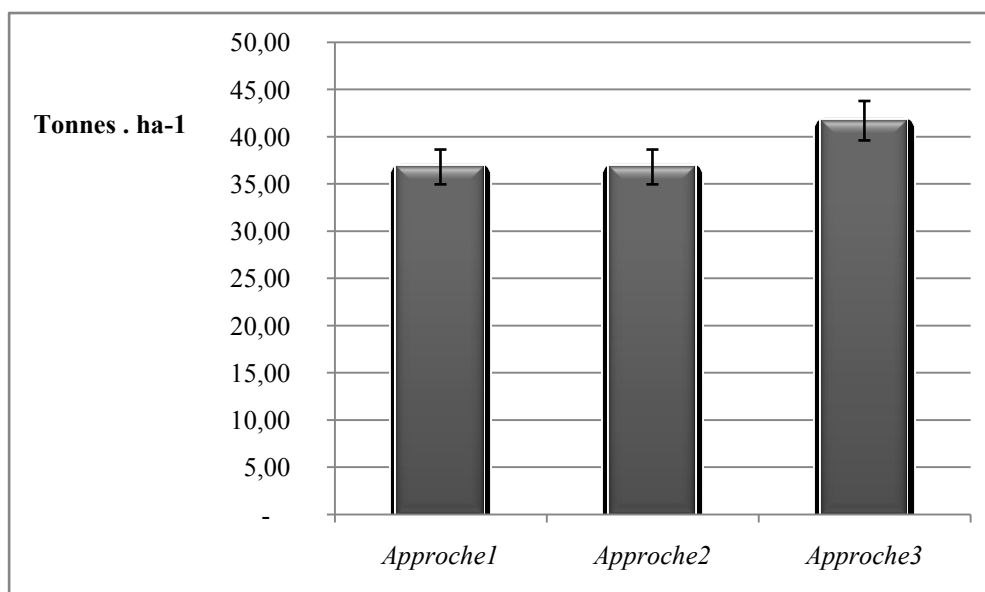


Figure 5 : Stock de carbone de la forêt hypothétique par approche

L'ANOVA associée au test HSD de Tukey (Annexe 10) concluent que les stocks de carbone calculés selon les 03 approches ne sont pas significativement différents ($p = 0.959$, $\alpha = 0.05$, $ddl=2$).

Préalablement au lancement de l'ANOVA, les conditions d'homogénéité des variances des groupes et de normalité des observations ont été testées. Les tests de Levene et de Bartlett révèlent que les variances ne sont pas significativement différentes ($p = 0.958$, $p=0.971$ pour Levene et Bartlett respectivement, $\alpha = 0.05$, $ddl1 = 2$, $ddl2 = 9$) entre les groupes (Approche 1 à 3) (Annexe 11). Le test de Shapiro-Wilk et le test de Lilliefors concluent que les échantillons suivent une loi normale ($\alpha = 0.05$, $p = 0.995$ et 0.976 pour Shapiro-Wilk et Lilliefors respectivement) (Annexe 12).

La quantité de biomasse et le stock de carbone par approche calculés sur les 4 reliquats forestiers de Mandraka sont détaillés dans le Tableau 5. On s'aperçoit que les quantités de biomasse calculées utilisant les valeurs d'infradensité des *approche 1* et *approche 2* sont quasiment pareilles. Malgré le fait que l'ANOVA ne conclut pas à une différence significative au seuil de 5%, la quantité de biomasse pour l'approche 3 est systématiquement supérieure à celle calculée en suivant les *approches 1* et *2*. La différence en termes de quantité de carbone est de 5 MgC.ha^{-1} entre les *approches 1, 2* et l'*approche 3*.

Tableau 5 : Stock de carbone par approche

Quantité de biomasse estimée sur les placettes d'inventaire (Kg)	<i>Approche1</i>	<i>Approche2</i>	<i>Approche3</i>	Unité
BA_P1	15 655,80	15 604,12	17 723,37	Kg
BA_P2	19 063,13	19 087,72	21 679,51	Kg
BA_P3	22 493,23	22 536,85	25 171,84	Kg
BA_P4	18 006,05	18 008,91	20 869,96	Kg

Densité de biomasse par reliquat forestier	<i>Approche1</i>	<i>Approche2</i>	<i>Approche3</i>	Unité
DBA_F1	62 623,21	62 416,49	70 893,47	kg.ha ⁻¹
DBA_F2	76 252,53	76 350,89	86 718,05	kg.ha ⁻¹
DBA_F3	89 972,91	90 147,39	100 687,37	kg.ha ⁻¹
DBA_F4	72 024,20	72 035,65	83 479,83	kg.ha ⁻¹
	<i>Approche1</i>	<i>Approche2</i>	<i>Approche3</i>	Unité
DBAk moyen	73,62	73,63	83,42	tonnes.ha ⁻¹
écart-type	13,12	13,13	14,91	tonnes.ha ⁻¹

Carbone	36,81	36,81	41,71	tonnes.ha ⁻¹
erreur standard	6,56	6,56	7,45	tonnes.ha ⁻¹

Où *P1, P2, P3, P4* : Transects établis dans les reliquats *F1, F2, F3, F4* respectivement

BA : Biomasse aérienne, en Kg

DBA : Densité de biomasse aérienne, Kg.ha⁻¹

DBAk : Densité de biomasse aérienne pour l'approche *k* (*k* = 1, 2 ou 3)

3.3 Equation de passage de D_{12} vers ID

Le diagramme de dispersion montre clairement une relation linéaire entre D_{12} et ID (Figure 6). Les valeurs de D_{12} calculées dans cette étude sont reportées à l'Annexe 13. Le coefficient de corrélation de Pearson r est égal à 0.97, indiquant ainsi une relation positive et très élevée entre ces deux variables. La droite d'ajustement sur la Figure 6 a pour expression l'Equation 10.

$$ID = 0,755 D_{12} - 0.016$$

Equation 10 : Equation de la régression de ID en fonction de D_{12}

La pente et l'ordonnée à l'origine ne sont pas significativement différentes de zéro (0) (Tableau 6), ce qui signifie que ID est proportionnelle à D_{12} .

Tableau 6 : Résultats de l'analyse de régression de ID en D_{12}

Caractéristiques	Valeurs	
Modèle	$ID = a + b D_{12}$	
a	0.016 ± 0.007	p-value = 0.026*
b	0.755 ± 0.010	p-value < $2,2 \cdot 10^{-16}$ ***
r	0.974 ± 0.007	p-value < $2,2 \cdot 10^{-16}$
R^2	0.948	

Au regard de la qualité de l'ajustement, le modèle explique 95% de la variation totale de ID . Il permet ainsi d'effectuer des prédictions fiables sur ID en connaissant D_{12} . L'analyse des résidus a été effectuée visuellement. La fonction `layout(matrix(1:4, nrow=2))` puis `plot(res)` sur le logiciel R affiche les 04 graphiques diagnostiques de la Figure 7. Leurs interprétations ont été déjà reportées dans la partie « Matériels et méthodes ».

Tableau 7 : Résultats de l'analyse visuelle des résidus

Graphe	Niveau de satisfaction	
<i>Fitted vs residus</i>	Condition satisfaite	Figure 7A
<i>Q-Q plot</i>	Condition satisfaite	Figure 7B
<i>Scale-location</i>	Condition plus ou moins satisfaite	Figure 7C
<i>Residuals vs Leverage</i>	Condition plus ou moins satisfaite	Figure 7D

Le test t de student comparant les valeurs reportées par Rakotovao *et al.* (2012) et celles obtenues dans cette étude montre que ces valeurs ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% (Annexe 14). La relation linéaire établie (Equation 10) est donc utilisable.

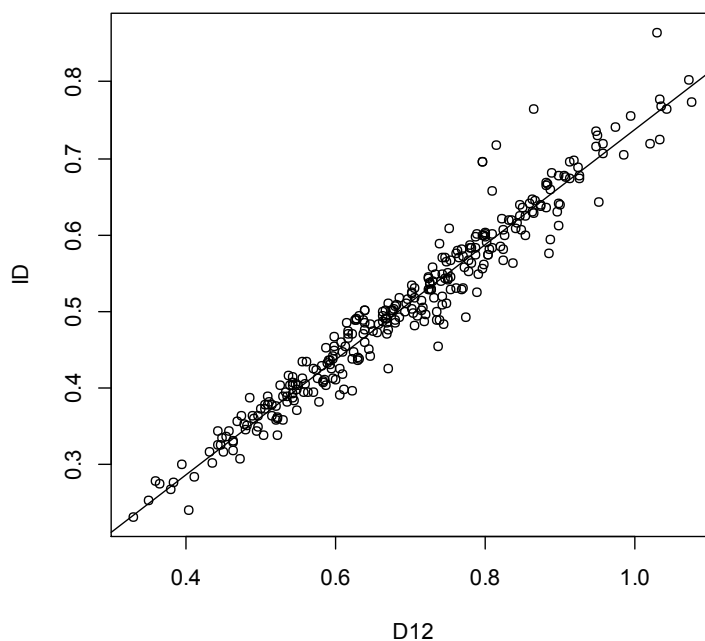


Figure 6 : Diagramme de dispersion et droite d'ajustement de ID en fonction de D_{12}

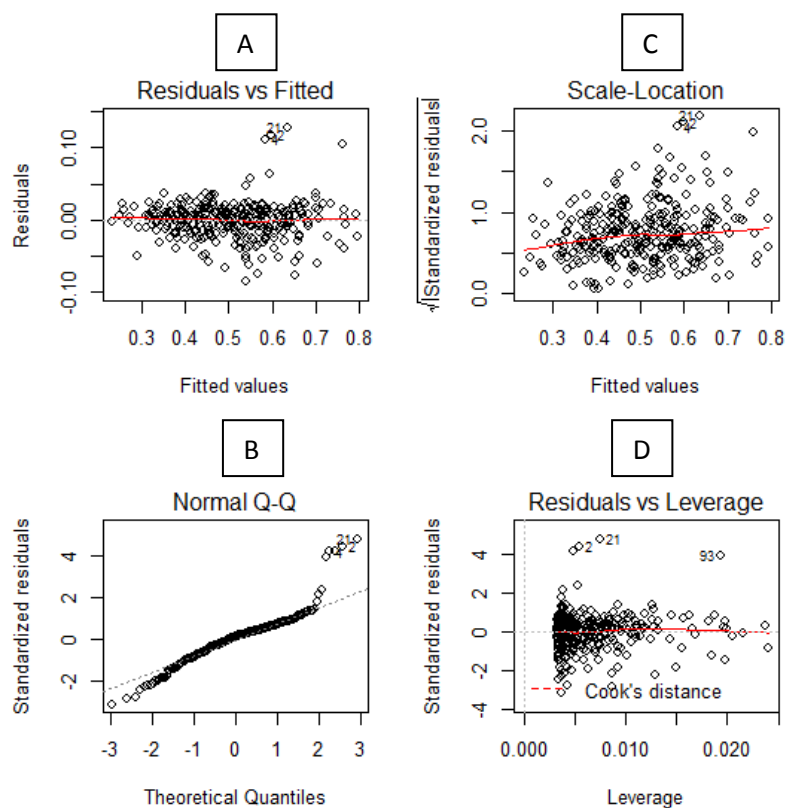


Figure 7 : Graphiques diagnostiques de la régression de ID en fonction de D_{12}

4

DISCUSSIONS

4 Discussions

4.1 Acquis de la recherche

L'estimation du stock de carbone étant la base même du mécanisme REDD, cette étude a répondu à une question pertinente sur l'estimation de la biomasse aérienne et du stock de carbone qui utilise des équations allométriques incluant l'infradensité comme covariable. Bien que la présente étude conclut l'absence de différence statistique entre les stocks de carbone calculés selon les trois approches définies, l'exigence dans les estimations du stock de carbone forestier est actuellement à la précision. En effet, les calculs ont montré qu'il y a une différence de 5 MgC.ha^{-1} en utilisant les données d'infradensité mesurées sur le terrain et les données de la bibliographie. En 2011, le prix du carbone pour un projet REDD était de \$12 par tonne de CO_2 équivalent (Peters-Stanley and Hamilton, 2012) soit US\$44 par tonne de carbone, la différence entre l'Approche 1 et l'Approche 3 est donc de US\$ 220 par hectare, soit 440 000 Ariary par hectare. Cet écart est assez conséquent pour des forêts de grande étendue.

Les équations locales sont jugées les plus précises mais il faut également que les données à y inclure soient également précises afin de vendre les crédits carbone à un meilleur prix. Le diamètre est facilement mesurable, la mesure de hauteur a connu un récent développement des instruments ultrasoniques (Feldpausch *et al.* 2012, Marshall *et al.* 2012 ; Vieilledent *et al.* 2012) par rapport aux moyens conventionnels comme la perche télescopique, le haga ou le blume leiss. Pour l'infradensité, deux considérations sont à prendre en compte : le mode de calcul et le niveau phylogénique considéré. Cette étude a montré que l'infradensité de l'espèce la plus abondante est suffisante pour être retenue comme l'infradensité des espèces appartenant au même genre. L'abondance des espèces est une information accessible via les données d'inventaire. En définitive, le choix entre utilisation de valeurs locales ou de données issues des bases de données dépend donc du niveau d'exigence recherché (Marshall *et al.* 2012) et de la différence de prix du carbone entre ces niveaux d'exigence.

En se basant sur les données reportées dans les bases de données internationales et la liste floristique de Rajaonera (2008), la forêt naturelle de Mandraka stockerait $45.48 \pm 3.47 \text{ MgC.ha}^{-1}$. A titre de comparaison, les stocks de carbone dans la forêt humide de Fandriana Marolambo (Andriamanohisoa, 2010), de Betaolana (Heritokilalaina, 2010) et de Fort-Dauphin (Rakotonarivo, 2010) sont de $97.78 \text{ MgC.ha}^{-1}$, $155 \pm 44 \text{ MgC.ha}^{-1}$ et $193 \pm 56 \text{ MgC.ha}^{-1}$ respectivement. La différence est imputable à la très faible proportion d'arbres de diamètre supérieur à 20 cm dans la forêt de Mandraka.

Cette étude a fourni des valeurs d'infradensité et de densité à 12% pour 14 espèces non encore répertoriées dans les deux bases de données consultées (Annexe 15). Le calcul de l'infradensité dans

cette étude, à partir de carottes de sondage, a été effectué conformément aux directives de Williamson et Wiemann (2010). Ces auteurs ont en effet présenté les différentes erreurs concernant la détermination de l'infradensité des arbres ou des espèces. Une des plus importantes est la non considération de la variabilité radiale de l'infradensité. La prise en compte de cette variabilité radiale a deux implications : (i) la nécessité de découper des carottes en segments de 1 cm et (ii) le calcul de l'infradensité d'un arbre comme étant la moyenne pondérée des infradensités des segments constitutifs, les poids étant constitués par la surface de l'anneau représenté par chaque segment. Un procédé de calcul identique est en fait important pour pouvoir comparer les résultats. Jusqu'à présent, très peu d'études utilisant l'infradensité ont utilisé ce mode de calcul. De plus, nous avons également proposé une formule de calcul de l'infradensité pour les arbres situés sur pente, ce qui constitue une innovation pour ce travail.

4.2 Limite de l'étude

La limite de cette étude est le nombre d'espèces étudiées (43) inférieur au nombre d'espèces recensées par Rajaonera (70). La raison à cette limite est principalement d'ordre pratique. En effet, le groupe électrogène n'a pu être posé sur les layons (surface relativement plane) et donc que la zone de prélèvement est limitée à un rayon de 20 mètres. De plus, certaines espèces sont rares et donc difficiles à trouver. Ce fait est le signe que la détermination de l'infradensité par l'*approche 1* est fastidieuse. Le meilleur moyen de localiser les espèces pourrait être de trouver les placettes de Rajaonera et d'y effectuer les prélèvements. A souligner également, nous avons prélevé des carottes sur *Bosqueia boiviniana* (Dipaty) alors que cette espèce n'a pas été recensée par Rajaonera. Le fait que nous ayons pu effectuer des prélèvements assez nombreux (8) signifie pourtant que l'espèce est facile à trouver.

4.3 Valeurs d'infradensité par espèce calculées dans cette étude

Les valeurs de l'infradensité obtenues dans cette étude ne sont pas significativement différentes de celles obtenues par Vieilledent *et al.* (2012) sur 08 espèces malagasy⁴ (ANOVA, $p = 0.237$, ddl = 16, $\alpha = 5\%$) (Annexe 16). Vieilledent *et al.* (2012) ont déterminé leurs valeurs à partir d'échantillons parallélépipédiques de 10 à 15 cm × 2 cm × 2 cm (longueur × largeur × hauteur) prélevés sur des arbres abattus, pris aux deux extrémités du fût, en son milieu et sur une branche. De plus, ils ont obtenu leur masse anhydre à partir d'une formule de conversion puisque leurs échantillons ont été séchés dans l'étuve à 75°C et non à 103°C comme l'exige la norme AFNOR NFB 51 004 (AFNOR, 1985). Le mode de détermination de l'infradensité à partir de carotte de bois utilisé dans cette étude est donc valable.

⁴ *Anthocleista madagascariensis*, *Eugenia emirnensis*, *Chrysophyllum boivinianum*, *Oncotsemum sp*, *Tambourissa madagascariensis*, *Homalium sp*, *Macaranga sp*, *Schefflera sp*

4.4 Relation entre ID et D_{12}

La relation entre ID et D_{12} développée dans cette étude est linéaire (Equation 10 et Figure 6). Les paramètres de l'équation de la droite de Reyes *et al.* (1992) et de celle développée dans cette étude sont très proches, de même que les coefficients de détermination (Tableau 8). Ce fait pourrait témoigner de la validité de la relation établie.

Tableau 8 : Equations de régression de ID en fonction de D_{12}

$ID = 0.0134 + 0.800 D_{12}$	$R^2 = 0.988$	Equation 11 : Equation de régression de ID en fonction de D_{12} , Reyes <i>et al.</i> (1992)
$ID = -0.016 + 0,755 D_{12}$	$R^2 = 0.948$	Equation 10 : cette étude

Une autre expression plus complexe liant ID et D_{12} (Equation 12) a été établie par Guilley (2000) mais pour une seule espèce *Quercus praeta* Liebl. Nous n'avons pas recherché une relation de même type puisqu'il nous fallait un modèle indépendant de l'espèce. Par ailleurs, le coefficient de détermination obtenu dans l'Equation 10 développée dans cette étude est déjà suffisamment élevé (0,948).

$$Id = d_{sec} \times \frac{1}{(1 + \frac{h_{sec}}{100}) \times (\frac{CGV}{100} \times (h_{sat} - h_{sec}) + 1)},$$

Equation 12 : Expression de ID en fonction de D_{12} , Guilley (2000)

CGV : coefficient de gonflement volumétrique, h_{sat} et h_{sec} humidité en % respectivement au point de saturation des fibres et à l'état sec à l'air.

4.5 Vérification des hypothèses

Au regard des tests statistiques de comparaison des stocks moyens de carbone, la première hypothèse qui stipule qu'« *il y a une différence significative entre les estimations du stock de carbone dont les valeurs de l'infradensité utilisées ont été déterminées sur la base d'échantillons de bois prélevés sur terrain et les estimations de ce stock avec des valeurs reportées dans les bases de données internationales* » a été rejetée bien que les valeurs de l'infradensité sur terrain et celles reportées dans les bases de données aient été statistiquement différentes. Cette absence de différence pourrait s'expliquer par le fait que la biomasse aérienne des arbres en forêts est dictée en majeure partie par le diamètre (Heritokilalaina, 2010). C'est la raison probablement pour laquelle bon nombre des équations allométriques pour les forêts tropicales sont uniquement basées sur le diamètre à

l'exemple de Brown *et al.* (1989), Brown (1997), Razakamanarivo (2005), Rarivomanana (2008), Rakotondrasoa (2009).

La seconde hypothèse qui est « *L'infradensité de l'espèce la plus abondante est suffisante pour représenter les autres espèces appartenant au même genre* » a été vérifiée. Cela implique de connaître l'abondance des espèces qui est une donnée disponible à partir des travaux d'inventaire floristique. Cette approche par abondance a été utilisée lors de l'élaboration des équations locales à la seule différence que c'est l'infradensité par arbre qui a été utilisée et non celle de l'espèce.

La troisième hypothèse, « *il existe une expression qui permet d'estimer l'infradensité d'une espèce donnée en connaissant sa densité à 12%* », a également été vérifiée. Il existe une relation linéaire entre l'infradensité et la densité à 12% des espèces malagasy. Reyes *et al.* (1992) ont également abouti à la même conclusion. Dans les cas où les valeurs de l'infradensité n'existent pas, cette relation peut être utilisée pour les approximer lorsqu'on dispose de la densité à 12%.

5

CONCLUSION

5 Conclusion

L'obtention ou l'octroi de crédits carbone dans le cadre d'un projet REDD+ nécessite la quantification du stock de carbone dans cette forêt à un moment donné. Pour ce faire, la biomasse aérienne des arbres doit être estimée avec un niveau élevé de précision (Tier III) conformément aux recommandations du GIEC. Pour le cas particulier de Madagascar, un des efforts entrepris dans ce sens a été la construction d'équations allométriques locales pour la forêt sèche et les forêts humides. Par ailleurs, dans le cas où les équations locales n'existent pas, une approche universelle en utilisant les équations allométriques génériques de Chave *et al* (2005) a été proposée. A quelques exceptions près, les meilleurs modèles locaux incluent parmi leurs variables explicatives l'infradensité. Cette variable est considérée comme importante dans l'estimation du stock de carbone dans les forêts tropicales. Le problème majeur qui se pose à Madagascar est la relative déficience d'informations sur cette variable.

Pour la forêt de Mandraka, l'objectif général de l'étude a été de déterminer si les stocks de carbone obtenus en utilisant des données sur l'infradensité issues de prélèvements de carottes de bois sur terrain diffèrent significativement des résultats obtenus à partir de données tirées des bases de données nationales et internationales les plus à jour et reconnues. Pour la forêt hypothétique établie, l'étude conclut que les valeurs de l'infradensité issues des prélèvements sur terrain sont significativement différentes des valeurs reportées dans les bases de données existantes. Toutefois, cette différence ne se ressent pas au niveau des stocks de carbone, qui eux, ne sont pas significativement différents d'un point de vue statistique. Cela implique que l'estimation de la biomasse aérienne et du stock de carbone en forêt peut se fier aux données disponibles sur l'infradensité.

Par ailleurs, cette étude conclut également que l'espèce la plus représentée pour un genre donné pourrait suffire pour représenter les autres espèces appartenant au même genre, ceci afin d'alléger les travaux fastidieux de prélèvement de bois sur terrain. Des méthodes ont aussi été proposées par Baker *et al* (2004) et Slik (2006) pour estimer l'infradensité d'une espèce donnée à partir de sa phylogénie. Il a été également démontré que la densité à 12% peut être convertie en infradensité au moyen d'une relation linéaire. Il y a donc actuellement assez de méthodes pour attribuer une valeur d'infradensité à chaque espèce. Comme la tendance est actuellement à la précision, disposer de valeurs de l'infradensité pour chaque espèce ou à défaut pour chaque genre serait un atout. En définitive, le choix entre utilisation de valeurs locales ou de données issues des bases de données dépend du niveau d'exigence recherché et de la différence de prix du carbone entre ces niveaux d'exigence. Les nouvelles informations obtenues étofferont les bases de données existantes à condition d'être mesurées correctement. Il importe également de mener des études sur la

variabilité (inter-site, inter-individu, inter-espèce, entre autres) de l'infradensité. Parallèlement à cela, il serait intéressant de déterminer la fraction carbone propre à chaque espèce puisque cette variable est fortement liée à l'infradensité. De récentes études ont démontré les implications de la connaissance de la fraction carbone sur l'estimation des stocks de carbone et des bénéfices ou pertes monétaires potentiels qui en découleraient.

6

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

6 Références bibliographiques

1. Aalde, H., Abdelgadir, A., Penman, J., Gytarsky, M. and Hiraishi, T. (2003), *Forest land. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*, Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, Kanagawa, Japan.
2. AFNOR NFB51-005, 1985, Bois, détermination de la masse volumique.
3. Agrawal, A., Nepstad, D. and Chhatre, A. (2011), “Reducing emissions from deforestation and forest degradation”, *Annual Review of Environmental and Resources*, **36**: 373-396.
4. Andriamanahisoa, S. (2010), *Développement d'équations allométriques en vue de la quantification du stock de carbone, Cas du site Fandriana Marolambo, Région Amoron'i Mania, Sud Est de Madagascar*, Mémoire d'Ingéniorat, Département Eaux et Forêts, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), Université d'Antananarivo.
5. Baccini, A., Goetz, S.J., Walker, W.S., Sun, M., Sulla-Menashe, D., Hackler, J., Beck, P.S.A., Dubayah, R., Friedl, M.A., Samanta, S. and Houghton, R.A. (2012), “Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density map”, *Nature Climate Change*, **2**, 182 – 185.
6. Baillères, H., Vitrac, O. and Ramanantoandro, T. (2005), "Assessment of continuous distribution of wood properties from a low number of samples: Application to the variability of modulus of elasticity between trees and within a tree", *Holzforschung*, **59**:524–530.
7. Baker, T.R., Phillips, O.L., Malhi, Y., Almeida, S., Arroyo, L., Difiore, A., Erwin, T., Killeen, T.J., Laurance, S.G., Laurance, W.F., Lewis, S.L., Lloyd, J., Monteagudo, A., Neill, D.A., Patino, S., Pitman, N.C.A., Silva, J.N.M. and Martinez, R.V. (2004), “Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass”, *Global Change Biology*, **10**: 545–562.
8. Brown, S., Gillespie, A. J. R and Lugo, A. E. (1989), “Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data”, *Forest Science*, **35**:881–902.
9. Brown, S. (1997), *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer*, Technical report, FAO Forestry Paper 134, Food and Agriculture Organisation (FAO), Rome, Italy.
10. Canadell, J.G and Raupach, M. (2008), "Managing Forests for climate change mitigation", *Science*, **320**:1456 -1457.
11. Chave, H., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M.A., Chambers, J.Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.P., Nelson, B.W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B. and Yamakura, T. (2005), “Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests”, *Oecologia*, **145**, 87–99.

12. Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernandez, A., Lao, S. and Perez, R. (2004), “Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, **359**, 409-420.
13. Chave, J., Condit, R., Muller-Landau, H.C., Thomas, S.C., Ashton, P.S., Bunyavejchewin, S., Co,L.L., Dattaraja, H.S., Davies, S.J., Esufali, S., Ewango, C.E.N., Feeley, K.J., Foster,R.B., Gunatilleke, N., Gunatilleke, S., Hall, P., Hart, T.B., Hernandez, C., Hubbell, S.P.,Itoh, A., Kiratipayoon, S., LaFrankie, J.V., Loo de Lao, S., Makana, J., Noor, M.N.S., Kassim, A.R., Samper, C., Sukumar, R., Suresh, H.S., Tan, S., Thompson, J., Tongco, M.D.C., Valencia, R., Vallejo, M., Villa, G., Yamakura, T., Zimmermann, J. K. and Losos, E.C. (2008), “Assessing evidence for a pervasive alteration in tropical tree communities”, *PLoS Biology* , **6** (3):e45.
14. Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S. L., Swenson, N. G. and Zanne, A. E. (2009), “Towards a worldwide wood economics spectrum”, *Ecology Letters*, **12**, 351–366.
15. Chudnoff, M. (1984), *Tropical timbers of the world*. Agriculture Handbook 607, Washington, DC: United States Department of Agriculture (USDA).
16. Cornelissen , J. H. C. , Lavorel , S. , Garnier , E. , Díaz , S. , Buchmann , N., Gurvich , D. E. and Reich, P. B. (2003), “A handbook of protocols standardisation and easy measurement of plant functional traits worldwide”, *Australian Journal of Botany*, **51**, 335 – 380.
17. Crowley, T.J. (2000),"Causes of climate change over the past 1000 years", *Science*, **289**:270-277.
18. De Castro, F., Williamson, G.B. and De Jesus, R.M. (1993), "Radial variation in the wood specific gravity of *Joannesia princeps*: the role of age and diameter", *Biotropica*, **25** (2):176-182
19. Ebeling, J. and Yasue, M. (2008),“ Generating carbon finance through avoided deforestation and its potential to create climatic, conservation and human development benefits“, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, **363**:1917–1924.
20. Fearnside, P M. (1997), “Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia”, *Forest Ecology and Management*, **90**, 59-87.
21. Ferguson, B. (2009), “REDD comes into fashion in Madagascar”, *Madagascar Conservation and Development*, **4** (2):132-137.
22. Feldpausch, T.R., Banin, L., Phillips, O.L., Baker, T.R., Lewis, S.L., Quesada, C.A., Affum-Baffoe, K., Arets, E.J.M.M., Berry, N.J., Bird, M., Brondizio, E.S., de Camargo, P., Chave, J., Djangbletey, G., Domingues, T.F., Drescher, M., Fearnside, P.M., França, M.B., Fyllas, N.M., Lopez-Gonzalez, G., Hladik, A., Higuchi, N., Hunter, M.O., Iida, Y., Salim, K.A., Kassim, A.R., Keller, M., Kemp, J., king, D.A., Lovett, J.C., Marimon, B.S., Marimon-Junior, B.H., Lenza, E., Marshall, A.R., Metcalfe, D.J., Mtchard, E.T.A., Moran, E.F., Nelson, B.W., Nilus, R., Nogueira, E.M., Palace, M., Patino, S., Peh, K.S.-H., Raventos, M.T., Reitsma, J.M., Saiz, G., Schrodte, F.,

- Sonké, B., Taedoumg, H.E., Tan, S., White, L., Wöll, H. and Lloyd, J. (2011), "Height-diameter allometry of tropical forest trees", *Biogeosciences*, **8**: 1081-1106.
23. Feldpausch, T.R., Lloyd, J., Lewis, S.L., Brien, R.J.W., Gloor, M., Monteagudo Mendoza, A., Lopez-Gonzalez, G., Banin, L., Salim, K.A., Affum-Baffoe, K., Alexiades, M., Almeida, S., Amaral, I., Andrade, A., Aragão, L.E.O.C., Araujo Murakami, A., Arets, E.J.M.M., Arroyo, L., Aymard, G.A., Baker, T.R., Banki, O.S., Berry, N.J., Cardozo, N., Chave, J., Comiskey, J.A., Alvarez, E., de Oliveira, A., Di Fiore, A., Djangbletey, G., Domingues, T.F., Erwin, T.L., Fearnside, P.M., França, M.B., Freitas, M.A., Higuchi, N., Honorio, E., Iida, Y., Jiménez, E., Kassim, A.R., Killeen, T.J., Laurance, W.F., Lovett, J.C., Malhi, Y., Marimon, B.S., Marimon-Junior, B.H., Lenza, E., Marshall, A.R., Mendoza, C., Metcalfe, D.J., Mitchard, E.T.A., Neill, D.A., Nelson, B.W., Nilus, R., Nogueira, E.M., Parada, A., Peh, K.S.-H., Pena Cruz, A., Peñuela, M.C., Pitman, N.C.A., Prieto, A., Quesada, C.A., Ramirez, F., Ramirez-Angulo, H., Reitsma, J.M., Rudas, A., Saiz, G., Salomão, R.P., Schwarz, M., Silva, N., Silva-Espejo, J.E., Silveira, M., Sonké, B., Stropp, J., Taedoumg, H.E., Tan, S., ter Steege, H., Terborgh, J., Torello-Raventos, M., van der Heidjen, G.M.F., Vasquez, R., Vilanova, E., Vos, V.A., White, L., Willcock, S., Woell, H. and Phillips, O.L. (2012), "Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates", *Biogeosciences*, **9**, 3381-3403.
24. Gibbs, H.K., Brown, S., Niles, J.O. and Foley, A.J. (2007), "Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality", *Environmental Research Letters*, **2**, 13 pp.
25. GIEC, (2007), *Résumé à l'intention des décideurs*. In: *Changements climatiques 2007: Les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK et New York, NY, USA.
26. Goodman, S. M. and Benstead, J. P. (2005), "Updated estimates of biotic diversity and endemism for Madagascar", *Oryx*, **39**:73–77.
27. Guilley, E. (2000), *La densité du bois de chêne sessile (Quercus petrae Liebl.): Elaboration d'un modèle pour analyse des variabilités intra- et inter-arbre; Origine et évaluation non destructive de l'effet "arbre"; Interprétation anatomique du modèle proposé*, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts (ENGREF).
28. Harris, N., Brown, S., Hagen, S.C., Baccini, A. and Houghton, R. (2012), *Progress toward a consensus on carbon emissions from tropical deforestation*, Winrock international and Woods Hole Research Center.
29. Harvey, C. A., Dickson, B. and Kormos, C. (2009), "Opportunities for achieving biodiversity conservation through REDD", *Conservation Letters*, **20**: 1-9

30. Henry, M., Besnard, A., Asante, W. A., Eshun, J., Adu-Bredu, S., Valentini, R., Bernoux, M. and Saint-Andre, L. (2010), "Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa", *Forest Ecology and Management*, **260**: 1375–1388.
31. 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*, Mémoire d'Ingéniorat, Département Eaux et Forêts, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), Université d'Antananarivo.
32. Herold, M. and Skutsch, M. (2011), "Monitoring, reporting and verification for national REDD+ programmes: two proposals", *Environmental Research Letters*, **6**:1-10.
33. Houghton, R.A. (2005), "Tropical deforestation as a source of greenhouse gas emissions", Tropical deforestation and climate change, Editors: Paulo Moutinho and Stephan Schwartzman
34. IPCC, (2003), *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry, IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme*, Institute for Global Environmental Strategies (IGES), ISBN 4-88788-003-0, Hayama, Japan.
35. IPCC, (2006), *Guidelines for national greenhouse gas inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*, Technical report, The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC/IGES, Kanagawa, Japan.
36. Jourez, B. (1997), "Le bois de tension : définition et distribution dans l'arbre", *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **1**, (2) : 100-112.
37. Kindermann, G., Obersteiner, M., Sohngen, B., Sathaye, J., Andrasko, K., Rametsteiner, E., Schlamadinger, B., Wunder, S., Beach, R., (2008), "Global cost estimates of reducing carbon emissions through avoided deforestation", *Proceedings of National Academic Sciences, USA* **105**: 10302–10307.
38. Lescuyer, G. et Locatelli, B. (1999), " Rôle et valeur des forêts tropicales dans le changement climatique", *Bois et Forêts des Tropiques*, **260**(2):5-17.
39. Luyssaert, S., Schulze, E.D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B.E., Ciais, P. and Grace, J. (2008), "Old-growth forests as global carbon sinks", *Nature*, **455**:213-215.
40. Marshall, A. R., Willcock, S., Platts, P. J., Lovett, J. C., Balmford, A., Burgess, N. D., Latham, J. E., Munishi, P.K.T., Salter, R., Shirima, D. D., and Lewis, S. L. (2012), "Measuring and modelling above-ground carbon and tree allometry along a tropical elevation gradient", *Biological Conservation*, **154**: 20-33.

41. Missouri Botanical Garden, (2010), Tropicos, botanical information system at the Missouri Botanical Garden, Catalogue of vascular plants of Madagascar.
42. Muller-Landau, H. C. (2004), "Interspecific and inter-site variation in wood specific gravity of tropical trees", *Biotropica*, **36**: 20-32
43. Nogueira, E. M., Nelson, B. W. and Fearnside, P. M. (2005), "Wood density in dense forest in central Amazonia, Brazil", *Forest Ecology and Management*, **208**: 261–286.
44. Nogueira, E.M., Nelson, B.W., Fearnside, P.M., França, M.B. and de Oliveira, A.C.A. (2008), "Tree height in Brazil's "arc of deforestation": Shorter trees in south and southwest Amazonia imply lower biomass", *Forest Ecology and Management*, **255**: 2963-2972.
45. Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, A.D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S. and Hayes, D. (2011), "A large and persistent carbon sink in the world's forests", *Science*, **333**: 988-993.
46. Parolin, P. (2002), "Radial gradients in wood specific gravity in trees of Central Amazonian foodplains", *IWA Journal*, **23** (4): 449-457.
47. Peters-Stanley, M. and Hamilton, K. (2012), *Developing dimension: State of the Voluntary carbon markets 2012*, A report by Ecosystem Marketplace and Bloomberg New Energy Finance.
48. Plugge, D., Thomas, B. and Kohl, M. (2011). "Reduced Emissions from Deforestation and Forest Degradation (REDD): Why a Robust and Transparent Monitoring, Reporting and Verification (MRV) System is Mandatory?" Climate Change - Research and Technology for Adaptation and Mitigation, Dr Juan Blanco (Ed.), ISBN: 978-953-307-621-8.
49. Rajaonera, M.L. (2008), *Mise en place d'un état de référence et d'un plan de suivi écologique permanent des vestiges de forêt primaire de la station forestière de Mandraka*, Mémoire d'Ingéniorat, Département Eaux et Forêts, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), Université d'Antananarivo.
50. Rajoelison, G., Rabenilalana, F.M. et Rakoto Ratsimba, H. (2008), *Rapport Final: Suivi écologique et analyse socio-économique d'un aménagement participatif de bassin versant dans la zone de Mandraka-Madagascar*, Centre for development and environment (CDE) - Eastern and Southern Africa Partnership Program (ESAPP) et le Département Eaux et Forêts de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), Université d'Antananarivo.
51. Rajoelison, G., Randriamboavonjy, J.C., Razafindramanga, M., Rabenilalana, F.M. et Rakoto Ratsimba H. (2007), *Rapport final: Aménagement participatif d'un bassin versant de la Mandraka*, Centre for development and environment (CDE) - Eastern and Southern Africa

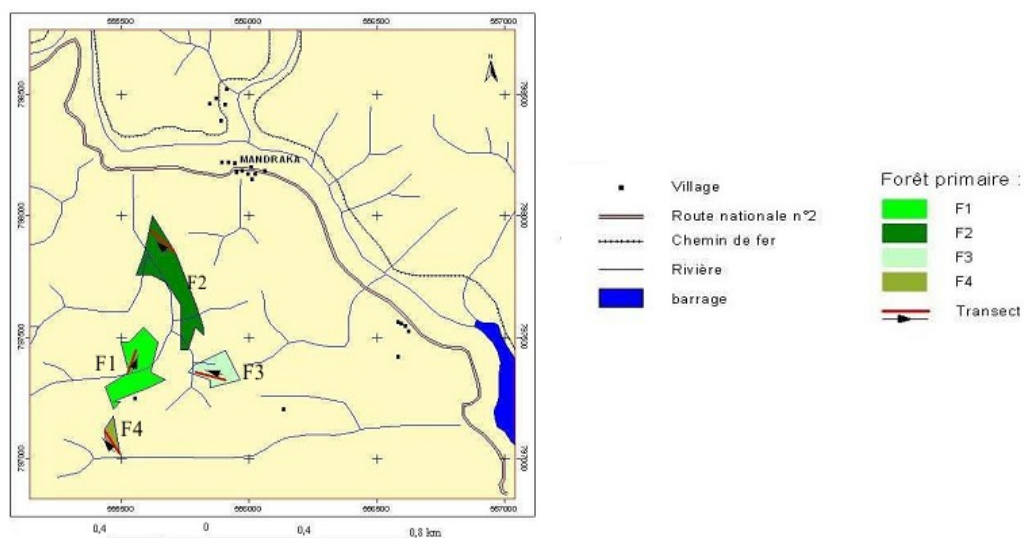
- Partnership Program (ESAPP) et le Département Eaux et Forêts de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), Université d'Antananarivo.
52. Rakoto Ratsimba, H. (2011), *Approche multi-scalaire de la déforestation et de la dégradation: évaluation du stock de carbone dans la forêt dense humide orientale de Madagascar*, Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo.
53. Rakotonarivo, O. S. (2010), *Les stocks de carbone de la biomasse aérienne et du sol selon la distribution altitudinale et le mode d'usage des terres en climat tropical humide et semi-aride, Cas de la région de Taolagnaro, Madagascar*, Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies, Option: Foresterie-Développement-Environnement Département Eaux et Forêts, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), Université d'Antananarivo.
54. Rakotondrasoa, O. (2009), *Etude du stock de carbone de la forêt de Manompana Nord-Est de Madagascar*, Mémoire de Diplômes d'Etudes Approfondies, Option: Foresterie-Développement-Environnement, Département Eaux et Forêts, Université d'Antananarivo.
55. Rakotovao G, Rabevohitra, A.R., Collas de Chaptelperron, Guibal, D. et Gérard, J. (2012), *Atlas des bois de Madagascar*, Edition Quae, 413p.
56. Rakotovololonalimanana, H., (2010), *Propriétés du bois et caractéristiques dendrométriques de Liquidambar styraciflua L de la Mandraka: étude des potentialités et de la variabilité intraspécifique*, Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies, Option: Foresterie-Développement-Environnement, Département Eaux et Forêts, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), Université d'Antananarivo.
57. Ramananantoandro T., (2001), *Prise en compte des caractéristiques technologiques du bois dans les méthodes d'amélioration génétique: application aux eucalyptus tropicaux*, Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies en Sciences du Bois, Université de Bordeaux 1, France.
58. Randrianasolo, Z. H. B. E. (2010), *Développement d'équations allométriques en vue de la quantification de la biomasse forestière aérienne, Cas du site d'Ivohibe, Région Ihorombe, Sud Est de Madagascar*, Mémoire d'Ingénieur, Département Eaux et Forêts, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), Université d'Antananarivo.
59. Rarivomanana, H. (2008), *Etude de stock de carbone de la forêt du Parc national Ranomafana*, Mémoire de Diplômes d'Etudes Approfondies, Option: Foresterie-Développement-Environnement, Département Eaux et Forêts, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), Université d'Antananarivo.
60. Razafindrabe, H.N. (2010), *Développement d'équations allométriques en vue de la quantification de la biomasse forestière aérienne, Cas du site de Bealanana, Région Sofia, Centre-Nord de*

- Madagascar*, Mémoire d'Ingéniorat, Département Eaux et Forêts, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), Université d'Antananarivo.
61. Razakamanarivo, H. (2005), *Etude du stock de carbone de la forêt dense sèche : forêt de Kirindy, forêt du Menabe central*, Mémoire de Diplômes d'Etudes Approfondies, Option: Foresterie-Développement-Environnement, Département Eaux et Forêts, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), Université d'Antananarivo.
 62. Reyes, G., Brown, S., Chapman, J. and 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.
 63. Saatchi, S.S., Harris, N.L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E.T.A, Salas, W., Zutta, B. R., Buermann, W., Lewis, S.L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M. and Morel, A. (2011), "Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents", *Proceedings National Academic of Sciences*, USA, **108**: 9899-9905.
 64. Sadourny, R. (1992), " L'homme modifie-t-il le climat ? ", *La Recherche*, **243** : 522-531.
 65. Sallenave, P. (1955), *Propriétés physiques et mécaniques des bois tropicaux de l'Union Française*, Nogent-sur-Marne, France, Centre Technique Forestier Tropical, 126 p.
 66. Scaranello, M.A., Alves, L.F., Vieira, S.A., de Camargo, P.B., Joly, C.A. and Martinelli, L.A. (2012), "Height-diameter relationships of tropical Atlantic moist forest trees in southeastern Brazil", *Scientia Agricola*, **69** (1):26-37.
 67. Slik, J. W. F. (2006), "Estimating species-specific wood density from the genus average in Indonesian trees", *Journal of Tropical Ecology*, **22**:481–482.
 68. Stern, N. (2006), *Stern Review: The Economics of Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
 69. Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), (2009), *REDD-plus: Champ d'application et des options pour le rôle des forêts dans les stratégies d'atténuation des changements climatiques*, Programme de conservation des forêts.
 70. van der Werf, G.R., Morton, D.C., DeFries, R.S., Olivier, J.G.J., Kasibhatla, P.S., Jackson, R.B., Collatz, G.J. and Randerson, J.T. (2009), CO₂ emissions from forest loss, *Nature Geosciences*, **2**: 737-738.
 71. Vieilledent, G., Courbaud, B., Kunstler, G., Dhote, J.F. and Clark, J. S. (2010), "Individual variability in tree allometry determines light resource allocation in forest ecosystems: a hierarchical Bayesian approach", *Oecologia*, **163**:759–773.

72. Vieilledent, G., Vaudry, R., Andriamanohisoa, S.F.D., Rakotonarivo, O.S., Randrianasolo, H.Z., Razafindrabe, H.N., Bidaud Rakotoarivony, C., Ebeling, J. and Rasamoelina, M. (2012), "A universal approach to estimate biomass and carbon stock in tropical forests using generic allometric models", *Ecological Applications*, **22** (2), 572-583.
73. Wiemann, M.C. and Williamson, G.B. (1988), "Extreme radial changes in wood specific gravity in some tropical pioneers", *Wood and Fiber Science*, **20**: 344-349.
74. Wiemann, M.C. and Williamson, G.B. (1989a), "Radial gradients in the specific gravity of wood in some tropical and temperate trees", *Forest Science*, **35**: 197-210.
75. Wiemann, M.C. and Williamson, G.B. (1989b), "Wood specific gravity gradients in tropical dry and montane rain forest trees", *American Journal of Botany*, **76**: 924-928.
76. Wiemann, M.C. and Williamson, G.B. (2012), "Density and specific gravity metrics in biomass research", United States Department of Agriculture (USDA), Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-208.
77. Williamson, G.B. and Wiemann, M.C. (2010a), "Age-dependent radial increases in wood specific gravity of tropical pioneers in Costa Rica", *Biotropica*, **42** (5), 590–597.
78. Williamson, G.B. and Wiemann, M.C. (2010b), "Measuring wood specific gravity correctly", *American Journal of Botany*, **97** (3), 519-524.
79. Woodcock, D.W. and Shier, A.D. (2003), "Does canopy position affect wood specific gravity in temperate forest trees?", *Annals of Botany*, **91**: 529-537
80. Zanne, A.E., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D. A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S.L., Miller, R.B., Swenson, N.G., Wiemann, M.C. and Chave, J. (2009), Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. Dryad Digital Repository. doi:10.5061/dryad.234.
81. Zarin, D. J. (2012), "Carbon from tropical deforestation", *Science*, **336**, 1518-1519.

ANNEXES

Annexe 1 : Localisation des 4 reliquats forestiers



Annexe 2 : Caractéristiques des placettes d'inventaire

Parcelles d'observations	F1	F2	F3	F4
Critères				
Superficie (ha)	3,40	4,47	1,61	0,42
Toposéquences	Mi-versants	Crêtes et haut versant Mi-versants	Crêtes et haut versant Mi-versants	Mi-versants
Altitude (m)	1328 - 1277	1313 - 1278	1312 - 1281	1366 - 1339
Pente	60%	13% - 55%	9% - 64%	60%
Orientation du transect	SSO - NNE	SE - NO	SSE - NNO	SSE - NNO

Annexe 3 : Abondance de chaque espèce de la liste floristique de Rajaonera et celle de la forêt hypothétique

	Nombre de pieds dans				Nombre de pieds dans 1 ha de				Ab dans FN	Ab dans FH
Noms scientifiques	P1	P2	P3	P4	F1	F2	F3	F4	(tiges/Ha)	(tiges/Ha)
#N/A			12	8	0	0	48	32	9,16	
#N/A			4		0	0	16	0	2,60	
#N/A	4				16	0	0	0	5,49	
<i>Agauria sp</i>			12	8	0	0	48	32	9,16	9,16
<i>Albizia gummifera</i>	26				104	0	0	0	35,72	35,72
<i>Anthocleista madagascariensis</i>	6	10	62	20	24	40	248	80	70,03	70,03
<i>Aphloia theiformis</i>		36		4	0	144	0	16	65,70	
<i>Bosqueia sp</i>			4	4	0	0	16	16	3,28	
<i>Brexiela sp.</i>				8	0	0	0	32	1,36	1,36
<i>Calophyllum sp</i>			1		0	0	4	0	0,65	0,65
<i>Cassinopsis m/sis</i>		12	4		0	48	16	0	24,27	24,27
<i>Chrysophyllum boivinianum</i>		12	6		0	48	24	0	25,58	25,58
<i>Cinchona officinalis</i>		4			0	16	0	0	7,22	
<i>Croton mongue</i>		12		18	0	48	0	72	24,73	
<i>Croton sp</i>		8			0	32	0	0	14,45	
<i>Dichaetanthera oblongifolia</i>		8			0	32	0	0	14,45	
<i>Dilobeia thouarsii</i>		4	4	6	0	16	16	24	10,84	10,84
<i>Dombeya laurifolia</i>	8	2			32	8	0	0	14,60	14,60
<i>Dombeya lucida, var ligidopsis</i>	42	4	20	6	168	16	80	24	78,95	78,95
<i>Dombeya sp</i>		4			0	16	0	0	7,22	
<i>Erythroxylum corymbosum</i>		8			0	32	0	0	14,45	14,45
<i>Erythroxylum sp</i>			12		0	0	48	0	7,81	
<i>Eugenia emirnenensis</i>		16	30		0	64	120	0	48,41	48,41
<i>Eugenia jambolana</i>	16	26	114	6	64	104	456	24	144,11	144,11
<i>Ficus marmorata</i>		4			0	16	0	0	7,22	
<i>Ficus tiliifolia</i>	8	32	8		32	128	32	0	73,99	
<i>Grevillia apelata</i>	8				32	0	0	0	10,99	
<i>Harungana madagascariensis</i>	6	6	6	4	24	24	24	16	23,66	23,66
<i>Helichrysum sp</i>	4	4		6	16	16	0	24	13,74	13,74
<i>Homalium sp.</i>	4	2		4	16	8	0	16	9,79	
<i>Homalium sp.</i>	7	18		2	28	72	0	8	42,46	42,46
<i>Ilex mitis</i>	9	10	16	38	36	40	64	152	47,28	47,28
<i>Macaranga cuspidata</i>	14	16	8	12	56	64	32	48	55,37	55,37
<i>Macaranga sp</i>			8		0	0	32	0	5,20	
<i>Macaranga sphaerophylla</i>	4				16	0	0	0	5,49	5,49
<i>Mapouria parkeri</i>		8	4		0	32	16	0	17,05	
<i>Mapouria sp</i>	24	16	28	28	96	64	112	112	84,83	84,83
<i>Micronychia madagascariensis</i>		20			0	80	0	0	36,12	36,12
<i>Micronychia madagascariensis</i>			32	22	0	0	128	88	24,55	24,55
<i>Mussaenda sp.</i>		4			0	16	0	0	7,22	7,22
<i>Nesogordonia sp</i>		12			0	48	0	0	21,67	21,67
<i>Nuxia capitata</i>	2	4		12	8	16	0	48	12,01	12,01
<i>Ochrocarpus parvifolius</i>	8	34	32	6	32	136	128	24	94,23	94,23
<i>Ochrocarpus sp</i>				8	0	0	0	32	1,36	
<i>Ocotea sp</i>			2		0	0	8	0	1,30	1,30
<i>Ocotea tricophlebia</i>	6		8	2	24	0	32	8	13,79	13,79

Suite Annexe 3	Nombre de pieds dans				Nombre de pieds dans 1 ha de				Ab dans FN	Ab dans FH
Noms scientifiques	P1	P2	P3	P4	F1	F2	F3	F4	(tiges/Ha)	(tiges/Ha)
<i>Oncostemon elephantites</i>	4				16	0	0	0	5,49	
<i>Oncostemum sp</i>			4		0	0	16	0	2,60	
<i>Oncostemum verticillatum</i>	2	4			8	16	0	0	9,97	9,97
<i>Phyllartrou sp</i>				4	0	0	0	16	0,68	
<i>Pittosporum verticillatum</i>		6			0	24	0	0	10,84	10,84
<i>Plagioscyphus gumelei</i>				16	0	0	0	64	2,72	
<i>Polyalthia emarginata</i>			4		0	0	16	0	2,60	
<i>Protochrys ditimena</i>	12	32		26	48	128	0	104	78,69	78,69
<i>Protochrys sp</i>		2	6	4	0	8	24	16	8,19	
<i>Ravensara acuminata</i>	12		16		48	0	64	0	26,89	26,89
<i>Ravensara crassifolia</i>		2	4	5	0	8	16	20	7,06	7,06
<i>Ravensara sp</i>	26	18	4	14	104	72	16	56	73,20	73,20
<i>Robbrechtia sp</i>			8		0	0	32	0	5,20	
<i>Schefflera voantsilana</i>	12	4	20	12	48	16	80	48	38,76	38,76
<i>Tambourissa m/sis</i>	8	4		8	32	16	0	32	19,57	19,57
<i>Tina sp</i>	4			4	16	0	0	16	6,17	6,17
<i>Tina sp</i>				4	0	0	0	16	0,68	
<i>Trema orientalis</i>	4				16	0	0	0	5,49	5,49
<i>Uapaca densifolia</i>		104			0	416	0	0	187,83	187,83
<i>Vaccinium sp</i>		48	12		0	192	48	0	94,50	
<i>Vernonia pectoralis</i>		4			0	16	0	0	7,22	
<i>Weinmannia minutiflora</i>	2	22	38	14	8	88	152	56	69,58	69,58
<i>Weinmannia sp</i>				4	0	0	0	16	0,68	
<i>Zanthoxylum m/sis</i>	4				16	0	0	0	5,49	
									1919,71	1495,93

Annexe 4 : Abondance de chaque espèce de la forêt hypothétique

Noms scientifiques	Nombre de pieds dans				Abondance dans 1 ha de				Abondance dans FN (tiges/Ha)
	P1	P2	P3	P4	F1	F2	F3	F4	
<i>Uapaca densifolia</i>		104			0	416	0	0	187,83
<i>Eugenia jambolana</i>	16	26	114	6	64	104	456	24	144,11
<i>Ochrocarpus parvifolius</i>	8	34	32	14	32	136	128	56	95,59
<i>Protorhus ditimena</i>	12	34	6	30	48	136	24	120	86,88
<i>Mapouria sp</i>	24	16	28	28	96	64	112	112	84,83
<i>Dombeya lucida var. lucidopsis</i>	42	4	20	6	168	16	80	24	78,95
<i>Anthocleista madagascariensis</i>	6	10	62	20	24	40	248	80	70,03
<i>Weinmannia minutiflora</i>	2	22	38	14	8	88	152	56	69,58
<i>Micronychia m/sis</i>		20	32	22	0	80	128	88	60,67
<i>Macaranga sp</i>	14	16	16	12	56	64	64	48	60,57
<i>Ravensara crassifolia</i>	18	12	4	13	72	48	16	52	51,21
<i>Eugenia emirnenensis</i>		16	30		0	64	120	0	48,41
<i>Ilex mitis</i>	9	10	16	38	36	40	64	152	47,28
<i>Homalium sp</i>	7	18		2	28	72	0	8	42,46
<i>Schefflera voantsilana</i>	10	4	20	12	40	16	80	48	36,01
<i>Albizia gummifera</i>	26				104	0	0	0	35,72
<i>Ravensara sp</i>	8	8	4	6	32	32	16	24	29,06
<i>Ravensara acuminata</i>	12		16		48	0	64	0	26,89
<i>Chrysophyllum boivinianum</i>		12	6		0	48	24	0	25,58
<i>Cassinopsis madagascariensis</i>		12	4		0	48	16	0	24,27
<i>Harungana madagascariensis</i>	6	6	6	4	24	24	24	16	23,66
<i>Erythroxylum corymbosum</i>		8	12		0	32	48	0	22,25
<i>Tambourissa madagascariensis</i>	8	4	4	8	32	16	16	32	22,17
<i>Nesogordonia sp</i>		12			0	48	0	0	21,67
<i>Dombeya laurifolia</i>	8	2			32	8	0	0	14,60
<i>Helichrysum sp</i>	4	4		6	16	16	0	24	13,74
<i>Oncostemum sp</i>	2	4	4		8	16	16	0	12,57
<i>Nuxia capitata</i>	2	4		12	8	16	0	48	12,01
<i>Dilobeia thouarsii</i>		4	4	6	0	16	16	24	10,84
<i>Pittosporum verticillatum</i>		6			0	24	0	0	10,84
<i>Ocotea sp2</i>	6				24	0	0	0	8,24
<i>Mussaenda sp</i>		4			0	16	0	0	7,22
<i>Tina sp</i>	4			8	16	0	0	32	6,85
<i>Trema orientalis</i>	4				16	0	0	0	5,49
<i>Macaranga sphaerophylla</i>	4				16	0	0	0	5,49
<i>Zanthoxylum tsihanhimposa</i>	4				16	0	0	0	5,49
<i>Ocotea sp1</i>			6	2	0	0	24	8	4,24
<i>Schefflera voantsilana</i>	2				8	0	0	0	2,75
<i>Ocotea sp3</i>			4		0	0	16	0	2,60
<i>Brexiela sp</i>				8	0	0	0	32	1,36
<i>Calophyllum sp</i>			1		0	0	4	0	0,65

Annexe 5 : Fiche de relevé de données sur terrain

Date	WP	nter	Nom vernaculaire	D (cm)	Cat.	Observations

Annexe 6 : Script de calcul ID avec R

<pre> azl<-read.table(file.choose(),header=TRUE,sep="\t",dec=",") t1<-table(azl\$nlab) aza<-as.data.frame(matrix()) for(i in 1:dim(t1)){aza[i,1]<-names(t1)[i]} FUN=function(numero) { az<-azl[azl\$nlab==numero,] az\$D<-0.5*(max(az\$di[az\$Côté=="H"])+max(az\$di[az\$Côté=="B"])+1) az\$Ri<-az\$D+az\$di+0.5 az\$tetai<-2*acos(az\$D/az\$Ri) az\$tsti=az\$tetai-sin(az\$tetai) az\$Ai<-0.5*(az\$Ri^2)*az\$tsti az<-az[az\$Côté!="H",] for(i in 1:nrow(az)) { if(az[i,8]=="H") { a1=az[i,9] for(j in 1:nrow(az)){if(az[j,9]==(a1-1)){az[i,20]<-az[j,19]}} } if(az[i,8]=="B") { a2=az[i,9] for(j in 1:nrow(az)){if(az[j,9]==(a2-1)){az[i,20]<-az[j,19]}} } } names(az)<-c(colnames(az[,1:19]),"A(i-1)") az\$Abi<-az\$Ai-az\$A(i-1) az<-az[az\$Côté=="B",] az\$Abi<-az\$Ai-az\$A(i-1) az\$ldpond<-(az\$ID*az\$Abi)/sum(az\$Abi) az\$IDfinale<-sum(az\$ldpond) res<-sum(az[,22]) return(res) } for(i in 1:nrow(aza)) { aza[i,2]<-FUN(as.integer(aza[i,1])) } for(i in 1:nrow(azl)){for(j in 1:nrow(aza)){if(as.integer(aza[j,1])==as.integer(azl[i,6])){aza[j,3]=azl[i,4]}}} names(aza)<-c("nlab","ld_finale","NV") write.table(aza,file="ldfin.xls",dec=",",sep="\t") </pre>	<p><u>NOTES</u></p> <p>- di : distance du segment Bi % moelle</p> <p>-Ri : rayon du cercle ayant pour centre le milieu de la carotte</p> <p>-acos : fonction arccosinus</p> <p>-tetai : angle teta pour le segment Bi</p> <p>-tsti :tetai moins sinus tetai</p>
---	---

Annexe 7 : Résultats des tests de normalité des infradensités pour chaque approche

	Test de Shapiro-Wilk		
	Approche 1	Approche 2	Approche 3
W	0,988	0,980	0,958
p-value	0,925	0,633	0,107
alpha	0,05	0,05	0,05

L'hypothèse que l'échantillon suit une loi normale est acceptée quand $p > 0.05$.

Annexe 8 : Résultats des tests d'égalité des variances des valeurs d'infradensité par approche

Test de Levene	
F (Valeur observée)	0,713
F (Valeur critique)	3,066
DDL1	2
DDL2	129
p-value (unilatérale)	0,492
alpha	0,05

L'hypothèse d'homogénéité des variances des groupes est acceptée pour $p > 0.05$

Annexe 9 : Résultats de l'ANOVA et du test LSD de Fisher sur les valeurs moyennes de l'infradensité selon les 3 approches

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	0,201	0,100	7,904	0,001
Erreur	129	1,640	0,013		
Total corrigé	131	1,841			

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
App.3 vs App.2	0,083	3,464	1,979	0,001	Oui
App.3 vs App.1	0,082	3,422	1,979	0,001	Oui
App.1 vs App.2	0,001	0,043	1,979	0,966	Non

Annexe 10 : Résultats de l'ANOVA et HSD Tukey sur les stocks de carbone

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	15983626,815	7991813,407	0,042	0,959
Erreur	9	1700134311,795	188903812,422		
Total corrigé	11	1716117938,610			

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
App3 vs App1	2448,521	0,252	2,792	0,966	Non
App3 vs App2	2447,951	0,252	2,792	0,966	Non
App2 vs App1	0,570	0,000	2,792	1,000	Non
Valeur critique du <i>d</i> de Tukey :			3,949		

Annexe 11 : Résultats des tests d'égalité des variances des 3 approches

Test de Levene	
F (Valeur observée)	0,044
F (Valeur critique)	4,256
DDL1	2
DDL2	9
p-value (unilatérale)	0,958
alpha	0,05

Test de Bartlett	
Khi ² (Valeur observée)	0,058
Khi ² (Valeur critique)	5,991
DDL	2
p-value (unilatérale)	0,971
alpha	0,05

L'hypothèse d'homogénéité des variances des groupes est acceptée pour $p > 0.05$.

Annexe 12 : Résultats des tests de normalités des observations à l'intérieur des 3 approches

Test de Shapiro-Wilk					
Approche1		Approche2		Approche3	
W	0,999	W	0,998	W	0,998
p-value	0,996	p-value	0,995	p-value	0,995
alpha	0,05	alpha	0,05	alpha	0,05

Test de Lilliefors					
Approche1		Approche2		Approche3	
D	0,157	D	0,159	D	0,157
D (normalisé)	0,313	D (normalisé)	0,317	D (normalisé)	0,315
p-value	0,980	p-value	0,976	p-value	0,978
alpha	0,05	alpha	0,05	alpha	0,05

L'hypothèse que l'échantillon suit une loi normale est acceptée quand $p > 0.05$.

Annexe 13 : Valeurs de D12 obtenues dans cette étude

Nom scientifique	Noms vernaculaires	d12	mind12	maxd12	n
<i>Tambourissa madagascariensis</i>	Ambora	0,640	0,562	0,680	6
<i>Pittosporum verticillatum</i>	Ambovitsika	0,696	0,685	0,706	2
<i>Trema orientalis</i>	Andrarezina	0,379	0,331	0,411	5
<i>Agauria sp</i>	Angavodina	0,702	0,645	0,754	4
<i>Bosqueia danguyana</i>	Dipaty	0,813	0,747	0,850	8
<i>Protorhus ditimena</i>	Ditimena	0,678	0,543	0,769	10
<i>Chrysophyllum boivinianum</i>	Famelona	0,701	0,623	0,773	10
<i>Cassinopsis madagascariensis</i>	Fandrianakanga	0,650	0,625	0,674	3
<i>Mussaenda sp</i>	Fatora	0,492	0,446	0,537	6
<i>Tina sp</i>	Felamborana	0,796	0,743	0,881	5
<i>Dombeya laurifolia</i>	Hafombintanina	0,683	0,628	0,768	6
<i>Nesogordonia sp</i>	Hafomerika	0,550	0,509	0,600	5
<i>Harungana madagascariensis</i>	Harongana	0,474	0,351	0,557	13
<i>Ilex mitis</i>	Hazondrano	0,619	0,540	0,679	11
<i>Oncostemum sp</i>	Hazotoho	0,778	0,743	0,823	4
<i>Erythroxylum corymbosum</i>	Hoditrovy	0,742	0,667	0,808	7
<i>Mapouria sp</i>	Kafeala	0,556	0,527	0,597	3
<i>Ochrocarpus parvifolius</i>	Kija	0,777	0,731	0,803	5
<i>Weinmannia minutiflora</i>	Lalona	0,864	0,795	0,952	4
<i>Anthocleista madagascariensis</i>	Lendemy	0,886	0,864	0,925	6
<i>Homalium sp</i>	Marefolena	0,679	0,574	0,787	7
<i>Macaranga sp</i>	Mokaranana	0,484	0,360	0,549	9
<i>Macaranga sphaerophylla</i>	Mongolahy	0,459	0,444	0,479	5
<i>Helichrysum sp</i>	Ramanjavona	0,610	0,570	0,655	4
<i>Brexiela sp</i>	Ranga	0,984	0,947	1,028	6
<i>Eugenia jambolana</i>	Rotra be ravina	0,905	0,843	0,956	6
<i>Eugenia emirnenensis</i>	Rotra madini-dravina	0,853	0,686	0,900	7
<i>Ravensara sp</i>	Tavolo ravingoavy	0,739	0,616	0,808	4
<i>Ravensara crassifolia</i>	Tavolomalama	0,767	0,668	0,840	11
<i>Ravensara acuminata</i>	Tavolopika	0,825	0,741	0,913	10
<i>Zanthoxylum tsihanhimposa</i>	Tsilomposa	0,531	0,494	0,584	5
<i>Micronychia madagascariensis</i>	Tsiramiramy	0,587	0,529	0,637	10
<i>Nuxia capitata</i>	Valanirana	0,888	0,831	0,925	10
<i>Dombeya lucida var. lucidopsis</i>	Valomena	0,676	0,482	0,780	10
<i>Ocotea sp1</i>	Varongy fotsy	0,635	0,587	0,680	4
<i>Ocotea sp2</i>	Varongy mainty	0,658	0,599	0,737	6
<i>Ocotea sp3</i>	Varongy mavokely	0,596	0,556	0,639	3
<i>Ocotea sp4</i>	Varongy ravimanga	0,746	0,596	0,809	9
<i>Calophyllum sp</i>	Vintanina	0,756	0,709	0,853	9
<i>Dilobeia thouarsii</i>	Vivaona	1,018	0,924	1,075	9
#N/A	Voafotsy	0,629	0,629	0,629	1
<i>Schefflera voantsilana</i>	Voantsilambato	0,568	0,504	0,671	10
<i>Schefflera sp</i>	Voantsilana ravimboanjo	0,550	0,432	0,781	9
<i>Uapaca densifolia</i>	Voapaka	0,770	0,738	0,815	7

<i>Albizia gummifera</i>	Volomborona	0,580	0,463	0,705	9
--------------------------	-------------	-------	-------	-------	---

Annexe 14 : Résultats du test de comparaison valeurs D12 de cette étude et D₁₂ de Rakotovao *et al.* (2012)

Nom vernaculaire	Noms scientifiques	Cette étude	Rakotovao et al.
		Moyenne	Moyenne
<i>Ambora</i>	<i>Tambourissa madagascariensis</i>	0,640	0,65
<i>Andrarezina</i>	<i>Trema orientalis</i>	0,379	0,45
<i>Dipaty</i>	<i>Bosqueia danguyana</i>	0,813	0,88
<i>Ditimena</i>	<i>Prothorus ditimena</i>	0,678	0,79
<i>Famelona</i>	<i>Chrysophyllum boivinianum</i>	0,701	0,68
<i>Harongana</i>	<i>Harungana madagascariensis</i>	0,474	0,51
<i>Hazondrano</i>	<i>Ilex mitis</i>	0,619	0,63
<i>Lalona</i>	<i>Weinmannia minutiflora</i>	0,864	0,80
<i>Lendemy</i>	<i>Anthocleista madagascariensis</i>	0,886	0,92
<i>Rotra be ravina</i>	<i>Eugenia jambolana</i>	0,905	0,82
<i>Rotra madini-dravina</i>	<i>Eugenia emirnensis</i>	0,853	0,77
<i>Tavolo ravingoavy</i>	<i>Ravensara sp</i>	0,739	0,74
<i>Tavolomalama</i>	<i>Ravensara crassifolia</i>	0,767	0,74
<i>Tsilomposa</i>	<i>Zanthoxylum tsihanihimposa</i>	0,531	0,66
<i>Valomena</i>	<i>Dombeya lucida var. lucidopsis</i>	0,676	0,56
<i>Varongy fotsy</i>	<i>Ocotea sp1</i>	0,635	0,60
<i>Varongy mainty</i>	<i>Ocotea sp2</i>	0,658	0,60
<i>Varongy mavokely</i>	<i>Ocotea sp3</i>	0,596	0,60
<i>Varongy ravimanga</i>	<i>Ocotea sp4</i>	0,746	0,60
<i>Vintanina</i>	<i>Calophyllum sp</i>	0,756	0,79
<i>Vivaona</i>	<i>Dilobeia thouarsii</i>	1,018	0,97
<i>Voantsilambato</i>	<i>Schefflera voantsilana</i>	0,568	0,57
<i>Voapaka</i>	<i>Uapaca densifolia</i>	0,770	0,80
<i>Volomborona</i>	<i>Albizia gummifera</i>	0,580	0,58

La différence est significative quand p-value < 0.05

Différence	0,006
t (Valeur observée)	0,146
t (Valeur critique)	2,013
DDL	46
p-value (bilatérale)	0,885
alpha	0,05

Annexe 15 : Les 14 nouvelles espèces dotées de valeurs d'infradensité et de densité à 12%

Nom scientifique	Noms vernaculaires	ID			D12			n
		ID	minId	maxId	d12	mind12	maxd12	
<i>Pittosporum verticillatum</i>	Ambovitsika	0,512	0,493	0,531	0,696	0,685	0,706	2
<i>Agauria sp</i>	Angavodina	0,500	0,451	0,545	0,702	0,645	0,754	4
<i>Cassinopsis madagascariensis</i>	Fandrianakanga	0,475	0,448	0,502	0,650	0,625	0,674	3
<i>Mussaenda sp</i>	Fatora	0,370	0,325	0,417	0,492	0,446	0,537	6
<i>Tina sp</i>	Felamborana	0,570	0,508	0,636	0,796	0,743	0,881	5
<i>Nesogordonia sp</i>	Hafomerika	0,383	0,339	0,412	0,550	0,509	0,600	5
<i>Erythroxylum corymbosum</i>	Hoditrovy	0,543	0,489	0,599	0,742	0,667	0,808	7
<i>Mapouria sp</i>	Kafeala	0,409	0,383	0,441	0,556	0,527	0,597	3
<i>Ochrocarpus parvifolius</i>	Kija	0,563	0,517	0,601	0,777	0,731	0,803	5
<i>Helichrysum sp</i>	Ramanjavona	0,443	0,426	0,472	0,610	0,570	0,655	4
<i>Brexiela sp</i>	Ranga	0,746	0,705	0,864	0,984	0,947	1,028	6
<i>Eugenia jambolana</i>	Rotra be ravina	0,672	0,612	0,735	0,905	0,843	0,956	6
<i>Micronychia madagascariensis</i>	Tsiramiramy	0,418	0,359	0,489	0,587	0,529	0,637	10
<i>Nuxia capitata</i>	Valanirana	0,665	0,620	0,698	0,888	0,831	0,925	10

Annexe 16 : Résultats ANOVA : Données de cette étude vs données de Vieilledent *et al.* (2012) pour 08 espèces

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	1	0,021	0,021	1,507	0,237
Erreur	16	0,223	0,014		
Total corrigé	17	0,244			

La différence entre les données de cette étude et celles de Vieilledent *et al.* (2012) est significative quand $p < 0.05$.