

## TABLE DES MATIERES

LISTE DES ABREVIATIONS .....	i
LISTE DES ANNEXES.....	ii
LISTE DES CARTES .....	ii
LISTE DES FIGURES.....	ii
LISTE DES PHOTOS.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	iii
LISTE DES UNITES ET SYMBOLES CHIMIQUES .....	iv
GLOSSAIRE.....	v
PARTIE 1 :INTRODUCTION.....	1
PARTIE 2 : METHODOLOGIE.....	2
1. CONTEXTE.....	2
1.1. Changement climatique et CO <sub>2</sub> .....	2
1.2. Rôles des écosystèmes forestiers dans la lutte contre le changement climatique .....	2
1.3. Voie oxalate-carbonate.....	3
2. PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES .....	4
3. MATERIELS ET METHODES .....	6
3.1. Zone d'étude.....	6
3.2. Méthodes .....	9
3.2.1. Phase préparatoire .....	9
3.2.2. Phase de terrain .....	12
3.2.3. Etude pédologique.....	13
3.2.4. Analyses en laboratoire .....	14
3.2.5. Traitement et analyses des données.....	15
3.3. Cadre opératoire .....	18
PARTIE 3 : RESULTATS .....	19
Chapitre 1 : ESPECES OXALOGENES DES REGIONS MERIDIONALE ET OCCIDENTALE DE MADAGASCAR .....	19
1.1. Espèces oxalogènes existant à Madagascar.....	19
1.2. Espèces, présumées oxalogènes, explorées dans la zone d'étude .....	21
1.2.1. Espèces présentant le potentiel d'oxalate de calcium.....	23
1.2.2. Espèces ne présentant pas le potentiel d'oxalate de calcium .....	27
1.3. pH eau .....	28

1.4.	Aspects phytosociologiques .....	28
1.4.1.	Structure floristique.....	28
1.4.2.	Espèces accompagnatrices .....	29
1.4.3.	Structure spatiale.....	30
Chapitre 2 : DIFFERENTS FACTEURS SUSCEPTIBLES D'INFLUENCER LA VOIE OXALATE-CARBONATE .....		31
2.1.	Type de sols rencontrés .....	31
2.1.1.	Sols ferrugineux jaune-rouges.....	31
2.1.2.	Sols ferrugineux lessivés .....	32
2.1.3.	Sols ferrugineux lessivés à tendance podzolique .....	33
2.1.4.	Sols ferrugineux rouges.....	33
2.1.5.	Sols hydromorphes.....	34
2.1.6.	Sols hydromorphes à caractère vertique.....	34
2.2.	Compartiment sol .....	35
2.2.1.	Caractéristiques généraux des propriétés des sols étudiés .....	35
2.2.2.	Profil des teneurs en $\text{CaCO}_3$ , en C et des Da au niveau des espèces oxalogènes .....	36
2.2.3.	Teneur en $\text{CaCO}_3$ des sols suivant différents facteurs.....	38
2.2.4.	Stocks de C et de $\text{CaCO}_3$ .....	40
2.2.5.	Corrélation entre les différentes variables étudiées.....	42
2.3.	Compartiment biomasse.....	44
2.3.1.	Teneur en $\text{CaCO}_3$ .....	44
2.3.2.	Teneur en C .....	44
PARTIE 4 : DISCUSSIONS .....		45
1.	Discussion sur la méthodologie.....	45
1.1.	Atouts .....	45
1.2.	Contraintes et limites.....	45
2.	Discussion sur les résultats et les hypothèses .....	47
3.	Recommandations .....	54
Axe d'orientation 1 : Mener des recherches complémentaires à la présente exploration.....		54
Axe d'orientation 2 : Valoriser les acquis de la présente étude.....		55
PARTIE 5 : CONCLUSION .....		59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....		60
ANNEXES		

## LISTE DES ABREVIATIONS

---

ANOVA	: Analyse Of Variance (analyse de variance)
CEA	: Commissariat à l'Energie Atomique
CM	: Coefficient de Mélange
Com. Pers.	: Communication Personnelle
CPCS	: Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols
CTFT	: Centre Technique Forestier Tropical
d <sub>1,30</sub>	: diamètre à 1,30 m du sol
Da	: Densité apparente du sol
FA	: Forêt Artificielle
FAO	: Food and Agriculture Organization
FDS	: Forêt Dense Sèche
GIEC	: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GPS	: Global Positioning System
h	: hauteur totale de l'arbre
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
JDC	: Jardin De Case
MBG	: Missouri Botanical Garden
MEF	: Ministère de l'Environnement et des Forêts
MNP	: Madagascar National Parks
MOS	: Matière Organique du Sol
N°	: numéro
ONE	: Office National pour l'Environnement
PBZT	: Parc Botanique et Zoologique de Tsimbazaza
PGC	: Plan de Gestion de Conservation
pH	: potentiel Hydrogène
PN	: Parc National
RN	: Route Nationale
S.f.	: Sous-famille
SA	: Savane Arbustive
SNGF	: Silo National des Graines Forestières
UE	: Union Européenne
UNEP	: United Nations Environment Programme
UNICOM	: Service de communication et d'audiovisuel de l'Université de Lausanne
$\alpha$	: seuil de signification

## LISTE DES ANNEXES

Annexe 1: Cartes de correspondance aire de répartition-type de sol des espèces à explorer.....	I
Annexe 2 : Carte de répartition des sols calcimorphes à Madagascar (Roederer et Bourgeat, 1972).....	XIII
Annexe 3 : Données climatiques des milieux d'étude .....	XIV
Annexe 4 : Localisation géographique, caractéristiques climatiques et mode d'usage des terres au niveau des points de prélèvement .....	XVI
Annexe 5 : Fiche d'observation de profils pédologiques .....	XVII
Annexe 6 : Mode opératoire du dosage de calcaire total au calcimètre Bernard .....	XVIII
Annexe 7 : Caractéristiques dendrologiques, écologiques et sylvicoles des espèces explorées .....	XX
Annexe 8 : pH eau des sols prélevés au niveau des espèces oxalogènes dans la zone d'étude .....	XXIV
Annexe 9 : Listes floristiques des espèces inventoriées dans la zone d'étude .....	XXV
Annexe 10 : Tableaux de présence-absence des espèces accompagnatrices inventoriées .....	XXVIII

## LISTE DES CARTES

Carte 1: Carte des régions d'étude .....	9
Carte 2: Carte pédologique de Madagascar-Classification CPCs.....	11
Carte 3: Carte des régions climatiques de Madagascar .....	11

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Processus oxalate-carbonate .....	3
Figure 2: Fosses pédologiques au pied et à 5m d'un arbre oxalogène .....	13
Figure 3: Structure totale .....	30
Figure 4: Structure des hauteurs .....	30
Figure 5: Teneur en $\text{CaCO}_3$ du sol au pied et à 5 m des espèces oxalogènes.....	37
Figure 6: Teneur en C du sol au pied et à 5 m des espèces oxalogènes .....	37
Figure 7: Profils densimétriques (Da) du sol au pied et à 5 m des espèces oxalogènes .....	38
Figure 8: Teneur en $\text{CaCO}_3$ selon le genre.....	38
Figure 9: Teneur en $\text{CaCO}_3$ selon le genre et la région.....	39
Figure 10: Teneur en $\text{CaCO}_3$ selon le genre et la profondeur au pied des arbres.....	39
Figure 11: Teneur en $\text{CaCO}_3$ selon l'espèce .....	40
Figure 12: Stock de $\text{CaCO}_3$ selon le genre .....	41
Figure 13: Stock de $\text{CaCO}_3$ selon le genre et la région .....	41
Figure 14: Stock de $\text{CaCO}_3$ selon l'espèce.....	42
Figure 15: Corrélation entre teneur en C et teneur en $\text{CaCO}_3$ (a) ; entre teneur en $\text{CaCO}_3$ et hauteur(b) .....	42
Figure 18: Corrélation entre stock de $\text{CaCO}_3$ et hauteur(a) ; entre d et h (b).....	43

## LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Délimitation des profondeurs de prélèvement .....	13
Photo 2: Ecorce de <i>Tamarindus indica</i> .....	13
Photo 3: Creux dans le tronc de <i>Casuarina cunninghamiana</i> .....	13
Photo 4: Lecture de la valeur du pH.....	14
Photo 5: Calcimètre de Bernard .....	15
Photo 6: <i>Ficus marmorata</i> (a), effervescence sur partie dégradée du bois sur pied (b) .....	23
Photo 7: <i>Ficus</i> sp (a) ; Effervescence sur bois dégradé (b) .....	23
Photo 8: <i>Ficus polita</i> (a) ; Effervescence sur bois dégradés (b) et au niveau du sol (c).....	24
Photo 9: <i>Ficus sycomorus</i> (a) ; effervescence sur bois dégradé (b) et au niveau du sol (c) .....	24
Photo 10: <i>Casuarina equisetifolia</i> (a) et <i>Casuarina cunninghamiana</i> (b) .....	24
Photo 11: <i>C. equisetifolia</i> : effervescence sur un fragment de bois (a) et au niveau du sol (b).....	25
Photo 12 : <i>C. cunninghamiana</i> : effervescence sur le bois (a) et sur caillou calcaire (c); caillou calcaire (b) .....	25
Photo 13: Pied de <i>Tamarindus indica</i> (a) ; effervescence sur l'écorce (b,c).....	25
Photo 14: <i>Ceiba pentandra</i> sur pied(a) ; chablis (b) ; effervescence sur bois mort (c) et sur le sol (d).....	26
Photo 15 : <i>Cordia myxa</i> (a) ; effervescence sur l'écorce (b) .....	26
Photo 16: <i>Broussonetia greveana</i> : chablis(a), effervescence sur le tronc (b) .....	27
Photo 17: Tronc de <i>Quivisianthe papinae</i> (a) ; effervescence sur écorce (b).....	27
Photo 18: Sols ferrugineux jaune-rouges à Sakaraha (a) et à Morondava (b).....	31
Photo 19: Sols ferrugineux lessivés à Sakaraha (a) et à Morondava (b) .....	32
Photo 20: Sols ferrugineux lessivés à tendance podzolique sous forêt sèche de Zombitse.....	33
Photo 21: Sols ferrugineux rouge à Sakaraha.....	33
Photo 22: Sols hydromorphes à Morondava .....	34
Photo 23: Sols hydromorphes à caractère vertique de Morondava .....	34

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Espèces oxalogènes issues de la littérature et celles existant à Madagascar .....	20
Tableau 2: Autres espèces, existant à Madagascar, susceptibles d'être oxalogènes .....	21
Tableau 3: Espèces explorées dans la zone d'étude .....	22
Tableau 4: pH du sol selon la région, la distance et la profondeur.....	28
Tableau 5: Composition floristique des différents types de station suivant le mode d'usage des terres.....	29
Tableau 6: Teneurs en $\text{CaCO}_3$ , en C et la densité apparente des sols.....	36
Tableau 7 : Stock de C du sol au pied des espèces oxalogènes.....	40
Tableau 8: Matrice de corrélation entre les différentes variables étudiées.....	43
Tableau 9: Teneurs en $\text{CaCO}_3$ et en C de la biomasse des espèces oxalogènes .....	44
Tableau 10: Vérification des hypothèses.....	53
Tableau 11 : Cadre logique d'intervention.....	57

## LISTE DES UNITES ET SYMBOLES CHIMIQUES

---

°C	: degré Celsius
C	: carbone
Ca	: calcium
CaCO <sub>3</sub>	: carbonate de calcium
CO <sub>2</sub>	: dioxyde de carbone
g	: gramme
GtC	: milliards de tonnes de carbone
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	: acide sulfurique
ha	: hectare
HCl	: acide chlorhydrique
kg	: kilogramme
m	: m
Mg	: mégagramme (1 Mg = 1 tonne)
ml	: millilitre
mm	: millimètre
mn	: minute
N/ha	: Nombre de tige par hectare

## GLOSSAIRE

- **Aire de distribution** : zone géographique de dimension variable où vit et se reproduit une espèce vivante (LISAN, 2012).
- **Arbres oxalogènes** : arbres capables, via la photosynthèse, de capturer le CO<sub>2</sub> atmosphérique et de le transformer en un sel organique, l'oxalate, puis en carbonate de calcium (WIRZ, 2011).
- **Atténuation** : intervention de l'homme visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre en provenance des sources ou à renforcer leurs absorptions par les puits (GIEC, 2001).
- **Bactéries oxalotrophes** : bactéries qui se nourrissent d'oxalate et l'utilisent comme source de carbone et d'énergie (GOBAT, ARAGNO et MATTHEY, 2010).
- **Biominéralisation** : formation de minéraux par des êtres vivants (DOVE et *al.*, 2003 in GOBAT *al.*, 2010 ). La biominéralisation du calcaire, telle qu'elle est considérée dans cette étude, consiste à la précipitation de carbonate de calcium par des microorganismes dont certaines bactéries dites oxalotrophes.
- **Bois mort**: totalité de la biomasse ligneuse morte qui n'est pas contenue dans la litière, et qui est sur pied, au sol ou dans le sol (GIEC, 2006).
- **Calcaire** : roche sédimentaire peu dure et blanche composée de carbonate de calcium (Microsoft Encarta, 2009).
- **Carbonatation minérale** : réaction entre du dioxyde de carbone et des roches silicatées contenant du magnésium et du calcium entraînant la formation de minéraux de carbonate géologiquement stables et inoffensifs pour l'environnement (calcite et magnésite), permettant ainsi le stockage du CO<sub>2</sub> sous une forme stable, inerte et solide (MAC, 2006).
- **Carbonate de calcium** (CaCO<sub>3</sub>) : composé inorganique très stable capable de stocker le C pour une durée de l'ordre du million d'années (ARAGNO et *al.*, 2010).
- **Chablis** : arbre, ou par extension ensemble d'arbres, renversé, déraciné ou cassé le plus souvent à la suite d'un accident climatique (vent, neige, givre, ...) mais également à cause d'une instabilité naturelle, d'une mauvaise exploitation, sans intervention de l'homme (www.crp-limousin.com, 2012).
- **Changement climatique** : variation de l'état du climat, que l'on peut déceler par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus (GIEC, 2007).
- **Cystolithes** : carbonate de calcium (BEN TER WELLE, 1980).

- **Gaz à effet de serre** : gaz qui absorbent une partie des rayons solaires en les redistribuant sous la forme de radiations qui rencontrent d'autres molécules de gaz, répétant ainsi le processus et créant l'effet de serre, d'où augmentation de la chaleur (GIEC, 2007).
- **Glacis** : surface d'érosion formant un plan légèrement incliné (Microsoft Encarta, 2009).
- **Inventaire forestier** : ensemble des activités permettant d'obtenir, avec une certaine précision, une ou plusieurs informations qualitatives ou quantitatives concernant une plantation ou une forêt naturelle, définies par ses limites géographiques. Le mot inventaire invoque des idées qui tournent autour de « recensement », « dénombrement » et « évaluation des quantités et qualités des ressources » (ANDRIANJAKA, 1998).
- **Litière**: totalité de la biomasse morte de taille supérieure à la limite définie pour la matière organique des sols (suggestion: 2 mm) et inférieure au diamètre minimum choisi pour le bois mort (10 cm, par exemple), mort sur le sol, à divers stades de décomposition, et située au-dessus ou à l'intérieur du sol minéral ou organique (GIEC, 2006).
- **Oxalate de calcium** : sel organique très peu soluble qui forme des cristaux dans les tissus de l'arbre (UNICOM, 2009).
- **Phytosociologie** : étude des associations végétales, basée sur des listes de groupements de végétaux. Elle permet de décrire et de classer la végétation d'un milieu de façon abstraite, mais souvent révélatrice des interactions entre les plantes et leur milieu ([www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com), 2012).
- **Puits** : tout processus, activité ou mécanisme qui élimine de l'atmosphère un gaz à effet de serre, un aérosol, ou un précurseur d'un gaz à effet de serre. Indiqué dans les étapes finales de la notification par le signe moins (-) (GIEC, 2007).
- **Raphides** : faisceau de fines aiguilles de cristaux d'oxalate de calcium (PRYCHID, 1999).
- **Refus** : éléments supérieurs à 2 mm de diamètre (COLLINET, 1969).
- **Source** : tout procédé, activité ou mécanisme qui libère dans l'atmosphère un gaz à effet de serre, un aérosol ou un précurseur de gaz à effet de serre. Indiqué dans les étapes finales de la notification par le signe plus (+) (GIEC, 2007).
- **Stock de carbone** : quantité absolue de carbone que renferme un réservoir à une période donnée (IPCC, 2007).
- **Stockage** : processus de rétention du CO<sub>2</sub> piégé de façon à ce qu'il ne puisse pas atteindre l'atmosphère (GIEC, 2007).
- **Volis** : partie d'un arbre, cassé à une certaine hauteur, sous l'action d'effets naturels (vent, foudre, neige, chute d'un autre arbre), sans intervention de l'homme ([www.crp-limousin.com](http://www.crp-limousin.com), 2012).



## **PARTIE 1 : INTRODUCTION**

---

## INTRODUCTION

Le changement climatique est un fait marquant des dernières décennies. Il résulte de l'augmentation de la quantité des « gaz à effet de serre » (GES) accumulés dans l'atmosphère dont le principal est le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) (GIEC, 2007). Aussi, pour atténuer le changement climatique, la maîtrise de l'accroissement des GES dans l'atmosphère est devenue une approche incontournable. Elle consiste à réduire les émissions de GES par les sources et à augmenter le stock dans les puits, notamment dans les écosystèmes forestiers.

Effectivement, les écosystèmes forestiers représentent plus de la moitié du stock de C des terres émergées avec un stock de 632 Gt dans le sol et 488 Gt dans la biomasse (GIEC, 2007). La matière organique du sol (MOS) est donc un compartiment essentiel en termes de quantité de C stocké. Cependant, elle ne constitue qu'un réservoir transitoire de carbone car sa décomposition par les microorganismes libère à nouveau le CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Une extrême variabilité du temps de résidence du C y est aussi notée, surtout entre la matière organique fraîche, qui ne permet de le séquestrer que l'espace d'une année, et l'humus stable, qui le fait pour une durée de près d'un millénaire (BALESDENT, 1996 In QUENEA, 2004). Dans l'optique d'optimiser le stock de C dans le sol, des recherches axées sur ce processus de stockage de C par la MOS sont menées à travers le monde. Mais, à côté de ce processus habituel, des chercheurs suisses ont découvert, en 1999, un processus potentiel de stockage de C passant par une voie dénommée « voie oxalate-carbonate ».

Ce processus a été observé chez l'Iroko, un arbre capable de fabriquer du calcaire à partir du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Comme toutes autres roches carbonatées, le calcaire produit permet de stocker le C pendant des millions d'années (RETALLACK, 1990 In ARAGNO et *al.*, 2010). La contribution de ce phénomène dans l'atténuation du changement climatique est donc évidente. En plus, il constitue un compartiment plus stable que la MOS. Il semblerait cependant que le phénomène soit plus associé à certaines espèces d'arbre et à des sols tropicaux acides dont la fertilité finit par être améliorée à l'issue du processus de biominéralisation (ARAGNO et *al.*, 2010). Les résultats des explorations menées en Afrique de l'Ouest, en Bolivie et en Inde, où le phénomène a été rencontré, ont confirmé cette hypothèse. Mais la voie oxalate-carbonate existe-t-elle pour autant dans d'autres pays tropicaux comme Madagascar?

La présente étude se propose d'y répondre à travers l'exploration de cette voie dans les régions méridionale (Sakaraha) et occidentale (Morondava) de Madagascar. Elle a été orientée vers la détermination des espèces oxalogènes dans cette zone et à l'évaluation de leurs potentiels respectifs. Pour sa part, cet écrit de recherche sera subdivisé en trois parties. La première sera consacrée aux méthodes adoptées et aux matériels utilisés dans le cadre de la détermination des espèces oxalogènes, de la conduite des investigations sur le terrain et des travaux en laboratoire nécessaires pour décrire le phénomène. La deuxième partie développera les résultats obtenus à l'issue de l'exploration sur le terrain, des analyses et du traitement des données collectées. La troisième partie relèvera des discussions émanant des résultats obtenus et de la démarche méthodologique adoptée afin d'en déduire des recommandations pragmatiques en perspectives de la présente étude.

## **PARTIE 2 : METHODOLOGIE**

---

## PARTIE 2 : METHODOLOGIE

### 1. CONTEXTE

#### 1.1. Changement climatique et CO<sub>2</sub>

L'augmentation de la température, la perturbation des saisons et l'intensification des catastrophes naturelles comme les cyclones, les inondations et la sécheresse observées ces derniers temps attestent que le changement climatique est bien réel (GIEC, 2011). Ces problèmes résultent de l'augmentation de la quantité des GES accumulés dans l'atmosphère qui sont surtout le CO<sub>2</sub>, le méthane (CH<sub>4</sub>), l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O), l'hydrofluorocarbène (HFC), le perfluorocarbène (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) (CEA, 2006). Le CO<sub>2</sub> en est le principal car sa durée de vie d'environ 100 ans et sa part égale à 80% des GES font de lui le plus persistant et le plus abondant parmi eux (GIEC, 2007).

L'augmentation de la proportion de CO<sub>2</sub> dans l'air est essentiellement due aux émissions anthropiques. 3/4 du CO<sub>2</sub> émis dans l'atmosphère serait dû à la combustion des énergies fossiles, le 1/4 étant attribué au changement d'usage des terres, particulièrement au déboisement (IPCC, 2007). Face à ce constat et aux impacts présents et potentiels du changement climatique, deux approches complémentaires se sont avérées indispensables. L'une relève de l'adaptation aux impacts de ce phénomène, l'autre consiste à l'atténuer en maîtrisant l'accroissement des GES dans l'atmosphère. Ceci revient à réduire les émissions de GES par les sources et à augmenter le stock dans les puits.

Le carbone (C) est en effet contenu, sous différentes formes, dans divers compartiments de l'environnement terrestre. Les plus importants en termes de quantité de C stocké sont les océans et le sol (UE, 2011). Les océans, avec 39 200 gigatonnes de C (GtC), représentent près de 93% du stock mondial, principalement sous forme de carbonates. Le sol, l'atmosphère et la biomasse terrestre se partagent les 7% restants, équivalent à 2940 GtC (GIEC, 2007). Le sol jusqu'à un (1) m de profondeur, dispose de près de la moitié de ce stock soit 1580 GtC. Dans ce tonnage, la part des sols forestiers est de 40% (GIEC, 2007). L'atmosphère a un stock de 750 GtC. La biomasse terrestre représente 610 GtC dont 80% est attribuée à la biomasse forestière (GIEC, 2007).

#### 1.2. Rôles des écosystèmes forestiers dans la lutte contre le changement climatique

Au total, les écosystèmes forestiers représentent plus de la moitié du stock de C des terres émergées avec un stock de 1120 Gt dont 632 Gt dans le sol et 488 Gt dans la biomasse. Ils apparaissent donc comme étant une composante importante dans le processus de séquestration du C. En effet, les forêts stockent du C dans la biomasse, via la photosynthèse, et dans les sols à travers la matière organique issue des résidus végétaux et animaux ainsi que des microorganismes telluriques. La MOS est un compartiment essentiel, de par sa taille, mais elle constitue une forme très instable en perpétuelle évolution. À l'issue de la décomposition de celle-ci, le C organique qu'elle contient finit par retourner à l'état de CO<sub>2</sub> atmosphérique après un temps de résidence extrêmement variable allant d'une année, pour la MO fraîche, à plus d'un millénaire pour l'humus stable (PARTON et *al.*, 1993; BALESSENT, 1996 In QUENEA, 2004). Comparé au temps de résidence du C dans des compartiments plus stables, comme les roches carbonatées qui le stockent pendant des millions d'années (RETALLACK, 1990 In ARAGNO et *al.*, 2010), celui de la MOS reste en moyenne court.

### 1.3. Voie oxalate-carbonate

En 1999, des chercheurs suisses ont trouvé que l'Iroko (*Milicia excelsa*), un arbre africain de la famille des MORACEAE, peut fabriquer du calcaire avec l'aide de certains microorganismes du sol. Cette biominéralisation du calcaire chez l'Iroko, déjà étudiée en 1932 puis en 1967 (MATTEO, 2011), résulte d'un processus complexe appelé « voie oxalate-carbonate » (Figure 1).

Le phénomène débute par la fixation de  $\text{CO}_2$  atmosphérique par l'arbre, pendant la photosynthèse, pour ensuite produire de l'acide oxalique. Cet acide s'associe avec le calcium (Ca) dans les tissus végétaux pour former l'oxalate de calcium qui, en étant pratiquement insoluble, va s'y accumuler sous forme de cristaux. Lorsque l'arbre perd ses feuilles, les champignons saprophytes de la litière vont libérer les cristaux d'oxalate dans les végétaux. Ces cristaux d'oxalate de calcium arrivent donc au sol où ils pourront être solubilisés par des bactéries oxalotrophes aérobies, dont les streptomycètes et les protéobactéries (BRAISSANT, 2005). La consommation de l'oxalate par ces bactéries oxalotrophes va en effet mener à l'oxydation du carbone de l'oxalate en carbonate. Cette oxydation est accompagnée de la libération d'une molécule de  $\text{CO}_2$  et d'ions hydroxyde qui vont rendre le milieu alcalin. Le  $\text{CO}_2$  va finalement réagir avec le Ca, préalablement libéré par les bactéries lors de la consommation de l'oxalate de calcium, pour aboutir à la précipitation de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) (ARAGNO et *al.*, 2010).

A ce processus s'ajoute la contribution des exsudats racinaires et des champignons producteurs d'oxalate qui approvisionneraient les bactéries oxalotrophes en ce sel organique. En outre, les racines de l'arbre seraient aussi à l'origine de l'accumulation de  $\text{CaCO}_3$  observées dans certaines plantes (BRAISSANT, 2005). Ce serait par le pompage d'une partie du  $\text{CaCO}_3$  en solution dans le sol que les racines permettraient au  $\text{CaCO}_3$  de passer dans les vaisseaux de la plante où il peut reprécipiter grâce à des phénomènes de capillarité (BRAISSANT, 2005).

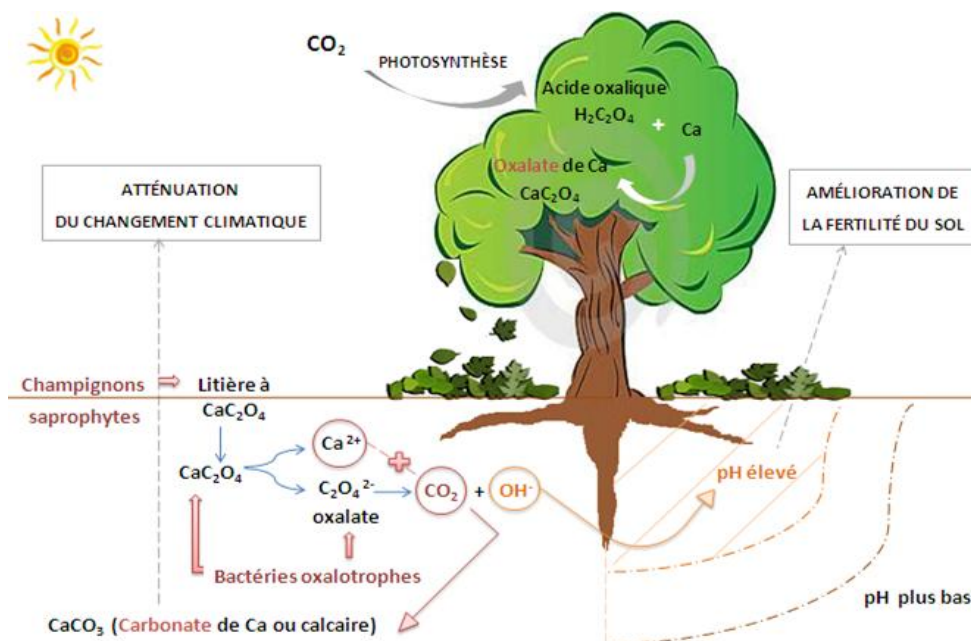


Figure 1: Processus oxalate-carbonate

Source : Auteur, 2012 (Inspirée de MATTEO, 2011)

Le  $\text{CaCO}_3$  étant capable de stocker le C pendant des millions d'années (ARAGNO et *al.*, 2010), la voie-oxalate-carbonate est donc un processus naturel efficient qui permet de lutter contre l'effet de serre et d'atténuer le changement climatique. Mais pour que la biominéralisation du calcaire puisse agir comme un puits net de C, il est primordial que le Ca utilisé dans ce processus provienne de source non calcaire (GUGGIARI, 2011). Pour cette raison, la voie oxalate-carbonate a été observée en particulier dans des sols tropicaux acides initialement dépourvus de calcaire comme les sols ferrallitiques (ARAGNO et *al.*, 2010). Dans ces sols acides, la voie oxalate-carbonate contribue également à l'amélioration de la fertilité du sol par correction de l'acidité via l'oxydation de l'oxalate (ARAGNO et *al.*, 2010). L'augmentation du pH engendre en effet l'amélioration de la capacité d'échange d'éléments nutritifs pour les plantes, la stabilisation de la matière organique et l'insolubilisation des éléments toxiques comme l'aluminium (GOLAY et DIETRICH, 2012).

Enfin, la voie oxalate-carbonate serait plus associée à un pédoclimat sec (TOUSSAINT, 2012) et à certaines espèces d'arbre (ARAGNO et *al.*, 2010). En Afrique, l'Iroko est la plus connue parmi elles, mais d'autres arbres comme *Bombax costatum* (BOMBACACEAE) et *Azelia africana* (CAESALPINACEAE) ont aussi ce potentiel. En Bolivie, les arbres biominéralisateurs sont : *Pentaplaris davidsmithii* (TILIACEAE), *Ceiba speciosa*, (BOMBACACEAE), *Terminalia amazonica* (COMBRETACEAE) et *Myroxolon balsamum* (CAESALPINACEAE) (ARAGNO et *al.*, 2010).

## 2. PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES

### 2.1. Problématique

La voie oxalate-carbonate observée en Afrique de l'Ouest, plus précisément au Côte d'Ivoire, au Cameroun et au Burkina Faso en 1999, a été recherchée en Bolivie en 2006 puis en Inde en 2010 (MATTEO, 2011). Pour Madagascar, aucune étude n'a été menée dans ce sens. Un tel phénomène pourrait pourtant lui ouvrir d'autres voies sur le marché de carbone tout en contribuant à l'amélioration de la fertilité des sols dégradés du pays. Et à première vue, les caractéristiques pédologiques et bioclimatiques malgaches permettent d'envisager l'existence de ce phénomène.

En effet, selon la classification pédologique de DELENNE et PELLETIER (1981), les sols malgaches sont à prédominance de sols ferrallitiques (46,5% de la superficie de la Grande Ile) et de sols ferrugineux (27,8%). Ces sols ont en général un pH acide. L'acidité est cependant moins prononcée chez les sols ferrugineux (RABEZANDRINA, 1993). Par ailleurs, la situation géographique de Madagascar lui confère un climat de type tropical qui présente toutefois de grandes différences régionales. Quatre (4) grandes régions bioclimatiques peuvent effectivement y être distinguées. Ce sont : la région orientale et Sambirano, la région méridionale, la région occidentale et la région centrale (BLASER et *al.*, 1990 In RAKOTONDRAZAFY, 2012). Cette grande variété climatique a permis à Madagascar de disposer d'une large gamme de formations végétales allant des forêts denses humides sempervirentes à l'Est aux forêts denses sèches caducifoliées à l'Ouest. Madagascar est en outre un des 12 pays à mégadiversité du monde (HARMON, 2002). Les forêts malgaches comprennent 4 220 espèces connues d'arbres et de gros arbustes (MEF et UNEP, 2010).

Par conséquent, il est fort probable que les différentes espèces oxalogènes des autres pays tropicaux cités précédemment existent à Madagascar. A la limite, elles y sont représentées par d'autres espèces de la même famille ou du même genre qui pourraient tout aussi bien avoir ce potentiel. Tels sont les cas de : *Broussonetia greveana* (MORACEAE), *Ceiba pentandra* (BOMBACACEAE) et *Tamarindus indica* (CAESALPINACEAE) entre autres (BLASER et *al.*, 1993).

A cet effet, la question de problématique générale de la présente étude est : « **La voie oxalate-carbonate observée dans d'autres pays tropicaux existe-t-elle pour autant à Madagascar et particulièrement dans les régions méridionale et occidentale de l'île?** »

Subséquentement, les questions de recherche s'énoncent :

- Les espèces potentielles trouvées dans d'autres pays se retrouvent-elles dans la région méridionale et la région occidentale de Madagascar?
- Existe-il d'autres espèces du même genre ou de la même famille qui contribueraient à ce processus ?
- Comment ces espèces à potentiel d'oxalate de Ca se répartissent-elles dans ces milieux d'étude ?
- Comment se présentent les stocks de  $\text{CaCO}_3$  induits par ces espèces?

## 2.2. Hypothèses

Les hypothèses à vérifier se subdivisent comme suit :

- Hypothèse 1 : Des espèces oxalogènes sont présentes dans les régions méridionale et occidentale de Madagascar.

Les régions méridionale et occidentale disposent de massifs forestiers relativement importants et diversifiés, représentés par des forêts denses sèches, des forêts épineuses et des mangroves. Ceci constitue déjà un atout considérable pour la recherche des espèces potentielles retrouvées dans d'autres pays dont les écosystèmes d'origine sont variés.

Plus spécifiquement, la famille des COMBRETACEAE, des FABACEAE et des MORACEAE sont respectivement représentées dans la zone d'étude par *Terminalia spp*, *Dalbergia spp*, *Ficus spp* qui figurent d'ailleurs parmi les espèces végétales endémiques de la région occidentale (MBG, 2004 In TRANS-MAD'DEVELOPPEMENT, 2006). *Tamarindus indica*, une espèce de la famille des FABACEAE et de la sous-famille des CAESALPINACEAE y est particulièrement abondante (TRANS-MAD'DEVELOPPEMENT, 2006). *Ceiba pentandra*, espèce exotique de la famille des BOMBACACEAE a été cultivée dans plusieurs villages de la partie Ouest de Madagascar où l'essence s'est acclimatée (MONTAGNAC, 1960). Il est ainsi fort possible que quelques pieds d'arbre de cette espèce y subsistent encore.

Les caractéristiques pédologiques de cette zone sont en outre susceptibles de satisfaire les conditions nécessaires à l'induction du phénomène recherché. Cette zone présente en effet un climat de type tropical chaud et correspond à une zone semi-aride avec une prépondérance de sols ferrugineux tropicaux répondant au critère d'acidité requis du sol.

- Hypothèse 2 : Le potentiel de la voie oxalate-carbonate y est régi par différents facteurs.
- Sous-hypothèse 2.1 : Le potentiel oxalogène de la région méridionale diffère de celui de la région occidentale.

La région méridionale et la région occidentale figurent parmi les 4 grandes régions bioclimatiques malgaches (BLASER et *al.*, 1990 In RAKOTONDRAZAFY, 2012). En tant que telles, ces deux régions présentent probablement des caractéristiques climatiques qui leur sont propres. Or, les propriétés du sol, notamment ses caractéristiques chimiques, peuvent être influencées par l'action conjuguée de certains facteurs climatiques, en l'occurrence la précipitation et la température qui contribuent d'ailleurs à la pédogénèse (DUCHAUFOR, 1995). Par conséquent, ces 2 régions devraient avoir également des caractéristiques pédologiques qui leur sont propres. A leur tour, ces spécificités d'ordre climatique et pédologique influent probablement sur l'arbre oxalogène, sa croissance, son développement et son aptitude à s'adapter, voire à survivre, dans le milieu considéré. Mais surtout, elles peuvent être un « facteur limitant » de l'induction de la voie oxalate-carbonate par leur aptitude à fournir un milieu favorable ou non aux microorganismes impliqués dans ce phénomène. Pour toutes ces raisons, le potentiel oxalogène est donc susceptible de varier suivant les régions.

- Sous-hypothèse 2.2 : Le potentiel oxalogène varie entre les espèces.

L'arbre oxalogène est un élément clé dans la voie oxalate-carbonate. Certaines espèces sont capables d'induire une forte biominéralisation du calcaire. Parmi les essences oxalogènes identifiées jusqu'à présent, l'Iroko est la plus célèbre en raison de son fort potentiel biominéralisateur (ARAGNO et *al.*, 2010). Il se peut donc qu'il ait un certain niveau en termes de potentiel oxalogène chez les espèces identifiées comme ayant ce potentiel (Com. Pers., CAILLEAU, 2012).

- Sous-hypothèse 2.3 : Le potentiel oxalogène varie suivant les dimensions des individus.

La photosynthèse effectuée par les arbres oxalogènes est à la base de la voie oxalate-carbonate (MATTEO, 2011). L'intensité photosynthétique est fonction de l'éclairement reçu par l'arbre et de ses dimensions. Les espèces oxalogènes à fort potentiel biominéralisateur rencontrées dans les autres pays tropicaux sont des arbres de grande taille (Com. Pers., CAILLEAU, 2012). Le potentiel oxalogène d'une même espèce est donc susceptible de varier suivant les dimensions des arbres oxalogènes considérés.

### 3. MATERIELS ET METHODES

#### 3.1. Zone d'étude

##### *a. Région méridionale*

Le Parc National Zombitse-Vohibasia et l'arboretum de la station de reboisement de Sakaraha sont les principaux milieux d'étude dans cette région. Mais des localités environnantes où des espèces à explorer peuvent être observées, ont été aussi considérées.

##### ➤ *Situation géographique et administrative*

Le PN Zombitse-Vohibasia se trouve dans le sud-ouest de Madagascar au Nord-Est de la ville de Sakaraha. Il appartient à la région Atsimo-Andrefana (Carte 1). Sa superficie, égale à 36 308 ha, est



répartie entre les parcelles de Zombitse (16 845 ha), Vohibasia (16 170 ha) et Isoky-Vohimena (3293 ha). L'arboretum se situe dans la station de reboisement de Sakaraha. Il a une superficie égale à 51 ha.

➤ **Géomorphologie et types de sol**

Le parc est situé sur le versant occidental d'un dôme gréseux à une altitude comprise entre 485 m et 825 m. Ces dômes sont des épandages de sables roux plus ou moins évolués et tronqués (Morat, 1973 In RAKOTOARIMANANA, 2002). Les sols sont du type ferrugineux tropicaux peu ou pas lessivés (RIQUIER, 1968 In RAKOTOARIMANANA, 2002).

➤ **Climat**

Le climat est de type chaud et semi-aride (RAKOTOARIMANANA, 2002). Deux saisons distinctes peuvent y être distinguées: la saison chaude et humide, de Novembre à Mars, et la saison fraîche et sèche d'Avril à Octobre. Une température moyenne annuelle de 23°C, avec une amplitude thermique de 9° C, a été notée sur la base des données climatiques enregistrées au niveau de la station météorologique de Sakaraha de 1961 à 1990 (Annexe 3). Un minima de 17,8°C est noté en juillet et un maxima de 26,8°C en janvier. Les précipitations sont très irrégulières et se répartissent sur 60 jours. La pluviométrie annuelle enregistrée est de 799,3 mm. Le mois de juillet est le moins arrosé avec 6,9 mm de précipitations. Le maximum est atteint en décembre avec 201 mm. Le fleuve Fiherenana, qui prend source au sein des dômes recouverts par les forêts de Zombitse et de Vohibasia, contribue peu à l'atténuation des contraintes hydriques de cette région à cause de la concentration de ses écoulements sur un faible nombre de jours.

➤ **Unité de végétation**

Trois (3) unités de végétation peuvent être distinguées dans le PN Zombitse Vohibasia: la forêt dense sèche, les savanes et les formations ripicoles.

La forêt dense sèche du PN Zombitse-Vohibasia est considérée comme une forêt intermédiaire entre les forêts sèches et humides de Madagascar car elle abrite des espèces floristiques du domaine du centre et celui du sud alors qu'elle se trouve dans l'ouest (KOECHLIN et *al.*, 1974 ; MORAT, 1973 ; DU PUY et CL, 1994 In PGC PN Zombitse-Vohibasia, 2003). Les savanes et les lisières forestières de Zombitse sont menacées par les feux de renouvellement de pâturage et de nettoyage des champs de culture ainsi que les défrichements à des fins agricoles (PGC PN Zombitse-Vohibasia, 2003).

**b. Région occidentale**

La forêt de Kirindy-Morondava et les villages alentours dont Beroboka-Atsimo, Ampataka et Marofandilia sont les principaux milieux d'étude dans cette région.

➤ **Situation géographique et administrative**

La forêt de Kirindy se trouve dans la partie Ouest de Madagascar, à 60 km au nord de Morondava sur la route vers Belo sur Tsiribihina (Carte 1). Elle appartient à la Commune de Bemanonga, au District de Morondava et à la Région de Menabe. Sa superficie est de 12500 ha.

### ➤ *Géomorphologie et types de sol*

La forêt de Kirindy est située dans une vallée s'étirant vers le Nord-Ouest en une vaste pénéplaine. L'altitude oscille entre 18 et 40 m et augmente dans la direction Ouest-Est. La topographie est plane avec des pentes inférieures à 5% (RAZAFINTSALAMA, 2004). Le sol est dominé par les sols ferrugineux et ses variantes. Les sols ferrugineux non lessivé rouge ou jaune se rencontrent sur les parties sommitales des sols sur glaciais, des sols en bordure des talwegs et des vallées secondaires. Les sols ferrugineux jaunes à concrétions s'observent sur les pentes faibles. Dans les parties légèrement déprimées et les sols en bordure des talwegs et des vallées, les sols peu évolués sur alluvions, les sols hydromorphes à caractère vertique, les sols ferrugineux rouges lessivés enrichis en argile et les sols non lessivés jaunes et rouges prédominent (RANDRIAMBOAVONJY, 1996).

### ➤ *Climat*

Le climat reste du type chaud et subaride avec une saison sèche beaucoup plus marquée. Celle-ci s'étend sur huit (8) mois alors que la saison humide ne dure que quatre (4) mois. La température moyenne annuelle est relativement plus élevée qu'à Sakaraha (25°C contre 23°C) pour la même période 1961-1990. Mais l'amplitude thermique est moins accusée avec une valeur de 6,5 °C. La température minima est de 21,5 °C en juillet et le maxima de 27,6 en janvier (Annexe 3). Du point de vue pluviométrique, Morondava est un peu moins arrosé et les précipitations sont encore plus irrégulières. Les 785 mm de pluviométrie annuelle ne se répartissent en effet que sur 44 jours. Au mois de juillet, elles ne sont que de 2,3 mm alors qu'elles atteignent les 241,6 mm en janvier. Il en résulte une forte variation de la disponibilité en eau. Dans la forêt de Kirindy, une rivière du même nom longe la forêt d'Est en Ouest. Mais elle est à sec pendant près de neuf (9) mois dans l'année (RAZAFINTSALAMA, 2004).

### ➤ *Unité de végétation*

Cette région présente également une biodiversité importante et divers écosystèmes. La végétation originelle de la forêt de Kirindy est une forêt dense sèche caducifoliée (RAZAFINTSALAMA, 2004). Elle présente des formations savanicoles, des forêts ripicoles, des forêts marécageuses, des marais herbeux et des mangroves.

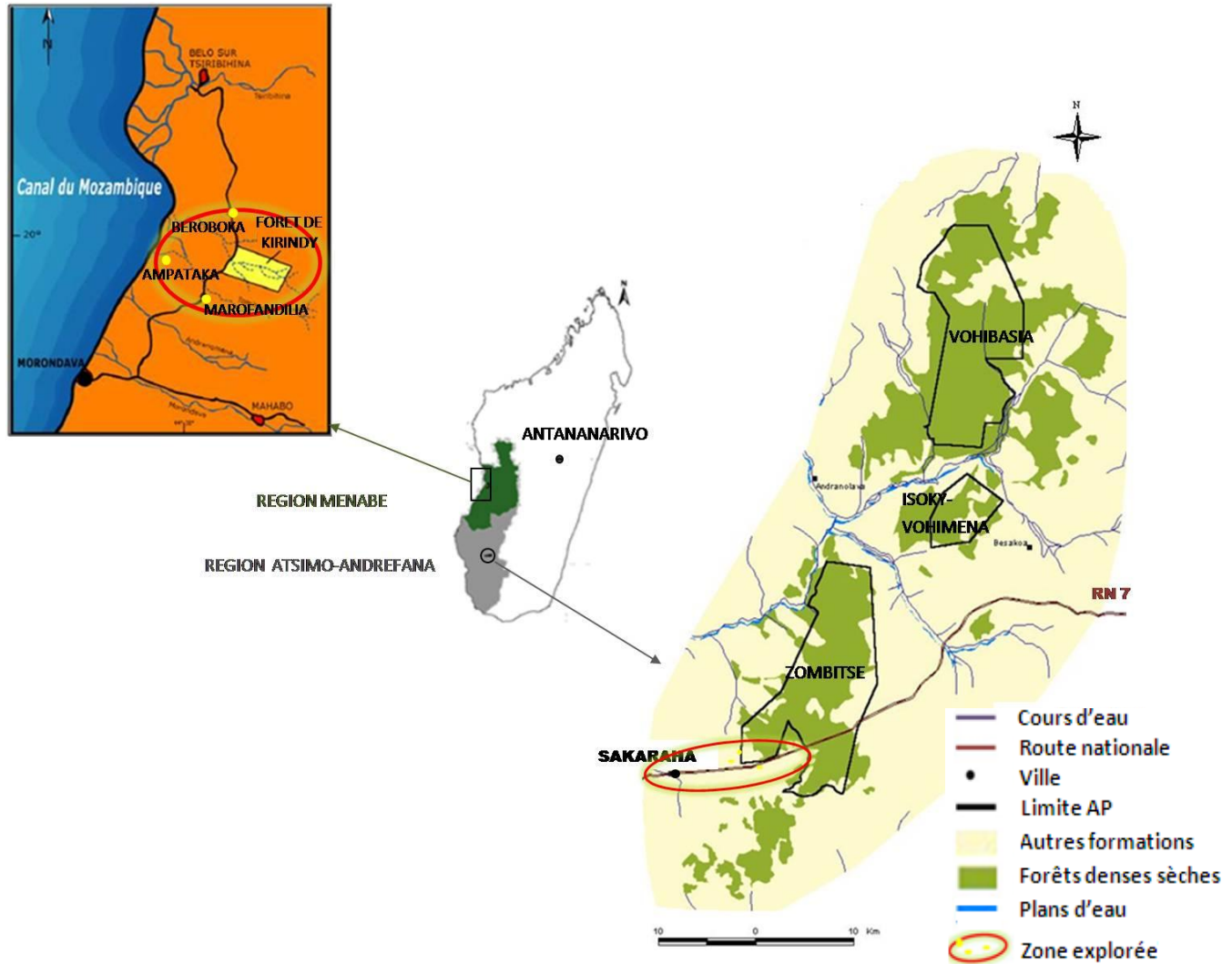
### *c. Points de prélèvement*

34 points de prélèvement, correspondant au nombre d'arbres explorés, ont été effectués dans la zone d'étude compte tenu des contraintes temps rencontrées sur le terrain. 17 points se trouvent dans la région méridionale et 17 autres dans la région occidentale. Ils étaient distribués de façon aléatoire dans la forêt dense sèche, la savane arborée, la forêt artificielle et les jardins de case suivant l'endroit où se trouve l'arbre à explorer.

Les points de prélèvement de la région méridionale sont répartis aux abords immédiats de la forêt de Zombitse le long de la RN7, au niveau des savanes arbustives adjacentes et dans l'arboretum de la station de reboisement de Sakaraha. Le type de sol au niveau des points de prélèvement correspond en général à un sol de type ferrugineux jaune-rouges (sables roux).

Les prélèvements dans la région occidentale ont été effectués dans la forêt de Kirindy et les villages alentours dont Beroboka-Atsimo, Ampataka et Marofandilia. En général, les sols sont aussi du type ferrugineux jaunes-rouges (sables roux). Toutefois, au niveau des zones de prélèvement de basse altitude, les sols hydromorphes à allure vertique sont plus fréquents.

Remarque : Dans tout ce qui suit, région méridionale et région occidentale seront désignées par Sakaraha et Morondava pour des raisons pratiques.



Carte 1: Carte des régions d'étude

Source : Auteur, 2012 (Adaptée de RAZAFIARISERA, 2001 et PGC PN Zombitse-Vohibasia, 2003)

## 3.2. Méthodes

### 3.2.1. Phase préparatoire

#### a) Détermination des espèces à potentiel d'oxalate de calcium

Une liste des espèces à potentiel d'oxalate de calcium déjà trouvées dans d'autres pays a été dressée à l'issue d'une investigation bibliographique (Tableau 1, page 20).

Les genres et les espèces qui existent à Madagascar ont été identifiés à partir d'une étude bibliographique axée principalement sur la consultation de : « Akon'ny ala n°12-13 » portant sur le choix des essences pour la sylviculture à Madagascar (BLASER et *al.*, 1993), « Fampandrosoana ny

fambolen-kazo » (« Pour promouvoir les plantations d'arbres ») (COOKE, BURREN et RAKOTONIAINA, 2009) et la base de données Tropicos (<http://www.tropicos.org/Project/MADA>). Les revues « Akon'ny ala n°12-13 » et « Fampanandrosoana ny fambolena-kazo » ont permis d'obtenir l'aire de répartition de la plupart des espèces cibles. La base de données Tropicos quant à elle a donné directement des zones voire des stations d'occurrence des espèces non traitées dans les deux (2) ouvrages. Des entretiens menés auprès de quelques botanistes du PBZT, du MBG et auprès du SNGF ont permis d'étayer les informations relatives aux espèces cibles et à leurs aires de répartition et/ou leurs zone d'occurrence.

D'autres espèces susceptibles d'avoir le potentiel oxalogène ont également été déterminées. Le critère de leur choix repose principalement sur la présence de cristaux d'oxalate de calcium dans le bois ou dans les autres parties végétatives de l'essence considérée. Ceci a été appréhendé à l'issue d'une investigation bibliographique.

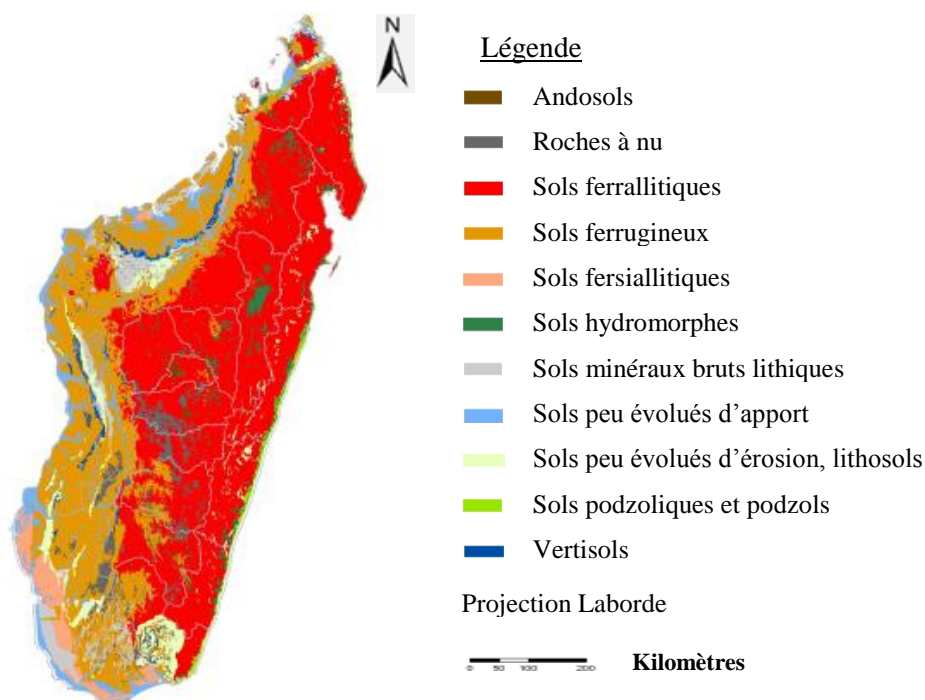
Les espèces à explorer à Madagascar, comprenant celles qui ont été déjà trouvées dans d'autres pays tropicaux, ont été déterminées par la suite.

### ***b) Identification des milieux d'étude***

Les milieux d'étude ont pu être identifiés, grâce à une étude cartographique. Une carte de correspondance entre l'aire de répartition des espèces oxalogènes cibles et les types de sol y afférent a été établie pour chaque espèce à explorer à Madagascar (Annexe 1). Elle a été réalisée par superposition de la carte de l'aire de répartition ou de la zone d'occurrence de l'espèce avec la carte pédologique de Madagascar selon ROEDERER et BOURGEAT (1972). Etant la plus détaillée par rapport aux types de sol, cette carte pédologique est la plus adaptée à cette étude. En effet, des informations précises sur la nature du sol des régions à explorer sont primordiales pour le bon déroulement de la recherche. Les sols ferralitiques et les sols ferrugineux tropicaux, répondant au critère d'acidité du sol nécessaire à l'induction du phénomène recherché, constituent les idéaux. Les sols calcaires sont à écarter pour éviter l'obtention de résultats erronés. Ainsi, pour avoir une vue plus précise des régions à éviter, une carte de la répartition des sols calcimorphes à Madagascar a été également réalisée (Annexe 2). Les cartes de l'aire de répartition des espèces cibles ont été effectuées par délimitation des limites de celle-ci sur une carte de Madagascar au moyen du logiciel QGIS 1.7.

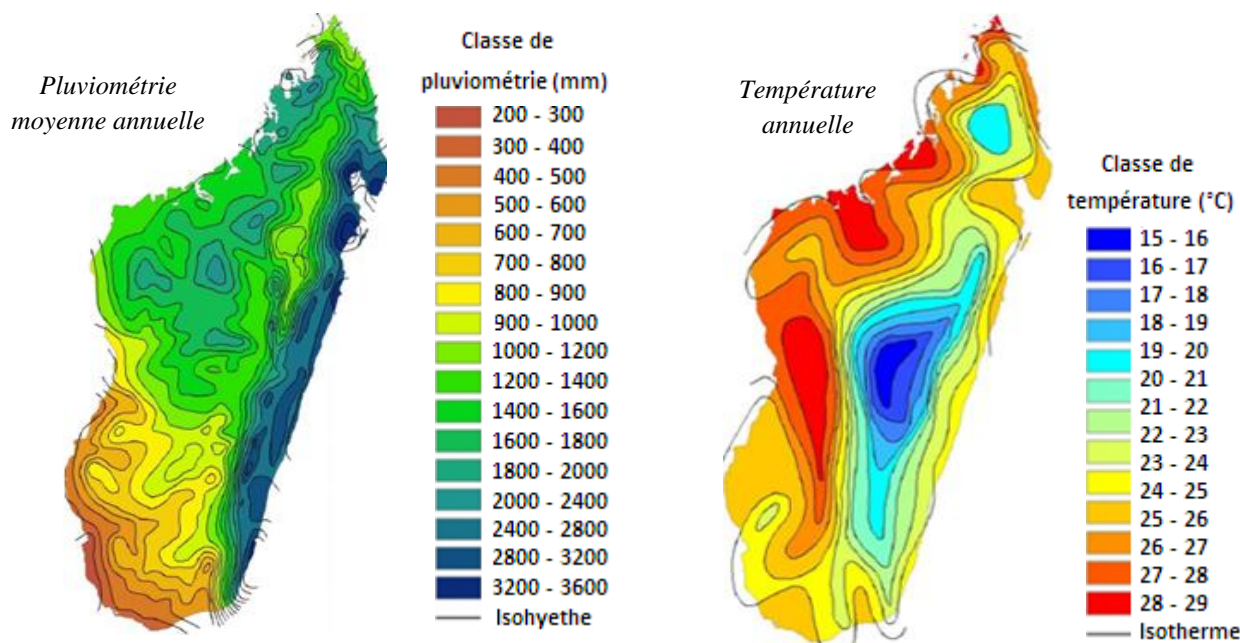
Compte tenue de l'étendue des aires de répartition de toutes les espèces à explorer à Madagascar, presque la totalité de la Grande-île peut être sollicitée pour la recherche. L'identification des régions d'étude a donc été focalisée davantage sur les conditions écologiques du milieu, notamment le type de sol et le climat, que sur l'aire de répartition des espèces qui est d'ailleurs restée incertaine et globale. Néanmoins, la priorité a été donnée aux régions présentant des sols acides, avec un pédoclimat sec, tout en coïncidant à l'aire de répartition d'un maximum d'espèces à explorer. Les massifs forestiers inclus dans cette zone ont été identifiés afin de délimiter davantage la zone d'étude tout en augmentant les chances de pouvoir trouver les espèces cibles qui sont surtout des espèces forestières.

A l'issue de cette étude cartographique, la zone d'étude choisie se situe dans la partie Ouest et Sud Ouest de l'île. Ce choix a été justifié par les caractéristiques pédologiques et les conditions climatiques de cette zone qui sont susceptibles de satisfaire les conditions nécessaires à l'induction du phénomène recherché. Elle est caractérisée par la prédominance de sols ferrugineux (Carte 2) qui sont certes moins acides que les sols ferrallitiques et correspond en général à une zone semi-aride et chaude (Carte 3). Les massifs forestiers considérés ont été ceux du PN Zombitse-Vohibasia et de la forêt de Kirindy-Morondava.



**Carte 2:** Carte pédologique de Madagascar-Classification CPC

Source: (DELENNE et PELLETIER, 1981 In RAZAFIMAHATRATRA, 2011)



**Carte 3:** Carte des régions climatiques de Madagascar

Source: (RAUNET, 1998 In RAZAFIMAHATRATRA, 2011)



### **3.2.2. Phase de terrain**

#### **a) Vérification terrain**

Des entretiens, effectués au niveau de l'Administration forestière locale et de l'entité gestionnaire du massif forestier ciblé, ont permis de déterminer le nombre exact d'espèces potentielles présentes dans le massif forestier considéré et ses environs. Leurs localisations respectives ont été sommairement identifiées.

Une visite de reconnaissance dans les secteurs facilement accessibles s'en est suivie dans l'optique de vérifier que les arbres pré-identifiés y sont toujours et qu'ils présentent effectivement des traces d'oxalate de calcium. Les présumées traces de calcaire visibles sur l'arbre et/ou sur les horizons de surface du sol sont testées avec de l'HCl dilué au 1/3 (1 volume d'acide + 3 volumes d'eau).

L'obtention d'effervescence sur les éléments testés témoigne de la présence de calcaire. Cette visite de reconnaissance a également permis de déterminer d'autres essences forestières oxalogènes qui ne figuraient pas dans la liste des espèces potentielles.

L'existence éventuelle de sol calcaire au niveau des milieux d'étude ainsi que leur localisation par rapport aux zones d'occurrence des espèces cibles ont fait l'objet de vérifications particulières.

#### **b) Inventaire forestier**

Après identification des espèces potentielles, un inventaire forestier focalisé sur les arbres oxalogènes a été conduit. L'objectif était de déterminer leurs dimensions exactes ainsi qu'une éventuelle association avec des taxons spécifiques. Des placettes circulaires avec un rayon de 5m, et donc une superficie de 78,5 m<sup>2</sup>, ont été mises en place, l'arbre oxalogène ciblé étant situé en son centre. Les espèces ligneuses incluses dans les placettes ont été inventoriées. Ceci a permis d'identifier les espèces qui co-existent avec chaque pied d'arbre cible.

Les paramètres dendrométriques pris sont principalement le diamètre à 1,30 m ( $d_{1,30}$ ) et la hauteur totale de l'arbre ( $h_{tot}$ ). Les coordonnées géographiques des arbres oxalogènes étudiés ont été prises à l'aide d'un GPS. Le  $d_{1,30}$  a été relevé à l'aide d'un compas forestier ou d'un ruban dendrométrique. Le recours à un haga ou à l'estimation à vue d'œil a permis d'obtenir la  $h_{tot}$  des arbres à inventorier.

Les arbres oxalogènes découverts lors de la visite de reconnaissance et dont les noms scientifiques étaient inconnus des guides locaux ont fait l'objet de prélèvement d'herbiers. Les noms vernaculaires et les herbiers confectionnés ont permis de déterminer l'espèce après consultation des ouvrages botaniques et l'herbier du PBZT (TAN).

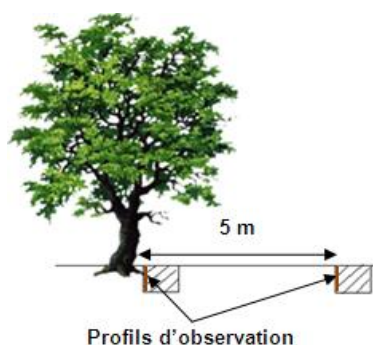
#### **c) Prélèvement des échantillons de sols et de biomasse**

Chaque arbre oxalogène étudié a fait l'objet de prélèvement d'échantillons de sols pour les analyses chimiques ultérieures et pour la détermination de la densité apparente du sol.

Des profils d'observation du sol (100 cm x 60 cm) ont été réalisés au pied et à 5m des grands arbres à potentiel d'oxalate (Figure 2). Les prélèvements de sol ont été effectués tous les 10 cm, avec des cylindres métalliques de 10 cm de hauteur, jusqu'à une profondeur de 30 cm (Photo 1). Chaque

profil a donc permis d'obtenir 3 échantillons : 0-10 cm ; 10-20 cm ; et 20-30 cm. Et à chaque pied d'arbre oxalogène étudié correspond 6 échantillons compte tenu des deux profils réalisés au pied et à 5m de l'arbre. Les échantillons sont mis dans des sachets en plastiques codés de façon à faciliter leur identification. Au total, 204 échantillons de sol ont été prélevés au niveau des 34 arbres explorés dans la zone d'étude.

Les échantillons de biomasse ont été prélevés au niveau des points où de l'effervescence a pu être observée sur l'arbre après test avec HCl. Ils étaient au nombre de 12 et incluaient de la litière, des écorces (Photo 2) et des bois dégradés localisés au niveau des blessures et des creux naturels du tronc (Photo 3).



**Figure 2:** Fosses pédologiques au pied et à 5m d'un arbre oxalogène



**Photo 1:** Délimitation des profondeurs de prélèvement



**Photo 2:** Ecorce de *Tamarindus indica*



**Photo 3:** Creux dans le tronc de *Casuarina cunninghamiana*

### 3.2.3. Etude pédologique

#### a) Description des fosses pédologiques

Une description simplifiée des profils d'observation de 60 cm de profondeur a été réalisée, en parallèle aux travaux de prélèvement, pour permettre d'identifier les types de sols prélevés. Les paramètres étudiés ont été : le nombre et les différents types d'horizons distingués, leurs profondeurs, leurs couleurs, leurs textures et leurs structures respectives. D'autres particularités comme le degré d'enracinement et la compacité ont été également observées (Annexe 5).

#### b) Mesure du pH du sol

La mesure du pH eau, pour les horizons 0-10 cm et 10-20 cm, au niveau de chaque profil au pied et à 5 m de l'arbre a été faite à l'aide de papiers pH. Quelques grammes de sols de ces horizons

sont mis dans une petite boîte pour y être dilués par de l'eau distillée. Les papiers pH sont ainsi introduits dans la solution obtenue. La valeur du pH est donnée par la valeur correspondant au virage de couleur du papier utilisé (Photo 4).



Photo 4: Lecture de la valeur du pH

### 3.2.4. Analyses en laboratoire

#### a) Préparation des échantillons à analyser

Les échantillons destinés au laboratoire sont soumis au préalable à différents traitements. Ils sont d'abord pesés pour déterminer leur poids à l'état humide. Puis une fraction représentative de l'échantillon est séchée à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante. Celle-ci est obtenue après 48h. La différence entre le poids avant et après séchage exprime la teneur en eau de l'échantillon initial. Les échantillons sont ensuite séchés à l'air dans une serre avant d'être broyé. Les mottes de terre sont d'abord réduites par pilage avant de passer sur un tamis de 2mm de mailles. Tout élément retenu par le tamis, est considéré comme du refus ( $d > 2 \text{ mm}$ ). Les refus sont pesés et retirés de l'échantillon initial qui sera broyé dans un mortier jusqu'à obtention de terre fine de 0,2mm.

Les échantillons de biomasse ont été emballés dans des sacs en papier avant d'être séchés dans une étuve à 65°C pendant environ 15 jours. Eux aussi ont fait l'objet d'analyses chimiques après broyage à 0,2 mm.

Les analyses en laboratoire ont été réalisées au Laboratoire des Radio-Isotopes d'Antananarivo (LRI). Elles ont été concentrées sur le dosage du C organique et du calcaire. Seuls les échantillons de sol ayant présenté de l'effervescence avec HCl ont été analysées en raison des contraintes liées au coût élevé des analyses (Tableau 3 de la page 22). Ces échantillons de sol étaient au nombre de 102.

#### b) Dosage du calcaire total (sol et biomasse)

Le dosage du calcaire total a été fait par calcimétrie (Annexe 6). La calcimétrie est une méthode d'analyse qui vise à doser le C minéral contenu dans les échantillons de sol ou de biomasse sous forme de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). Elle consiste à décomposer les carbonates contenus dans l'échantillon à analyser par de l'acide fort (HCl dilué à 1/3) puis à mesurer le C minéral dégagé sous forme de  $\text{CO}_2$ . Le volume ( $V_1$ ) de  $\text{CO}_2$  dégagé lors de la réaction à la température et à la pression atmosphérique est mesuré à l'aide de la burette à gaz du « calcimètre de Bernard » (Photo 5). Un poids connu de  $\text{CaCO}_3$  pur, préalablement séché à 105°C pendant 15h, est traité de la même manière dans les mêmes conditions de température et de pression pour servir d'étalon et donner un volume  $V_E$ . Le taux de carbonates exprimé en  $\text{CaCO}_3$  dans l'échantillon de sol peut être déterminé par comparaison de  $V_1$  et  $V_E$ .





Photo 5: Calcimètre de Bernard

### ***c) Dosage du C organique (sol et biomasse)***

Le dosage du C organique permet de déterminer la teneur en C dans le sol. Il a été réalisé suivant la méthode « Walkley-Black ». Par cette méthode, la matière organique est oxydée sans chauffage externe par une solution sulfurique de dichromate de potassium. L'excès de dichromate est ensuite dosé par le sel de Mohr.

Dans la pratique, une prise d'essai P de 0,25 à 5 g de sol selon sa teneur en matière organique présumée, est dosée avec 10 ml de l' $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentré et 5 ml de dichromate de potassium si  $P < 0,5\text{g}$  ou 10 ml si  $P > 0,5\text{g}$ . Après 30 mn, le mélange est dilué avec 100 ml d'eau distillée puis le résultat est lu sur le titrateur Crison. La valeur donnée par le titrateur correspond au volume de la descente de sel de Mohr nécessaire pour doser l'excès de dichromate.

Les résultats sont corrigés par un facteur d'humidité étant donné que la prise d'échantillon se fait sur un sol sec à l'air qui contient toujours une humidité résiduelle alors que les résultats des analyses de sols sont exprimés par rapport à un sol sec à  $105^\circ\text{C}$ .

Le procédé est exactement le même pour la détermination de la teneur en C des échantillons de biomasse. La prise d'essai P est cependant nettement plus réduite puisque les biomasses contiennent davantage de matière organique.

### ***3.2.5. Traitement et analyses des données***

#### ***a) Etude phytosociologique***

Les aspects phytosociologiques ont été appréhendés par l'étude de la structure floristique, notamment de la composition floristique, la richesse floristique et la diversité floristique.

La composition floristique est comprise à travers l'exploitation de la liste floristique. Celle-ci est établie après inventaire des espèces accompagnatrices. Elle permet de déterminer les principales familles associées aux espèces oxalogènes dans la formation forestière étudiée.

La richesse floristique est appréhendée par le nombre d'espèces présentes sur une espace donnée.

La diversité floristique est exprimée par la diversité spécifique, elle-même exprimée par le coefficient de mélange (CM).

$$CM = \frac{N \text{ sp}}{N \text{ d'individu total répertorié}}$$

La structure spatiale du peuplement formé par l'arbre oxalogène cible et les autres espèces ligneuses tout autour a été également analysée via la structure totale et la structure des hauteurs des peuplements.

**b) Calcul des stocks de C et de  $CaCO_3$**

➤ **Densité apparente**

La densité apparente du sol, paramètre indispensable pour calculer le stock de carbone, est obtenue par la formule suivante :

$$Da \text{ (g.cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{masse sèche de l'échantillon (g)}}{\text{volume de l'échantillon (cm}^3\text{)}}$$

La masse sèche est obtenue par soustraction de la masse de l'humidité de l'échantillon sur sa masse fraîche. Le volume de l'échantillon correspond à celui du cylindre utilisé pour le prélever soit un volume égal à 500 cm<sup>3</sup>.

➤ **Teneur en carbonates de calcium**

La teneur en carbonates de l'échantillon analysé s'obtient par la formule suivante :

$$t = 1000 \times \frac{V(\text{CO}_2) \text{ échantillon} \times m(\text{CaCO}_3)}{V(\text{CO}_2) \text{ étalon} \times m \text{ échantillon}}$$

Avec : t : teneur en équivalent  $CaCO_3$  (g.kg<sup>-1</sup>)

m ( $CaCO_3$ ) : masse de carbonate de calcium pesé pour l'étalonnage (g)

V ( $CO_2$ ) étalon : volume de  $CO_2$  dégagé par le carbonate de calcium (ml)

m échantillon : masse pesée d'échantillon inconnu (g)

V ( $CO_2$ ) échantillon : volume de  $CO_2$  dégagé par l'échantillon inconnu (ml)

➤ **Teneur en C organique du sol et de la biomasse**

La teneur en carbone est obtenue par la formule suivante :

$$C \text{ (g.kg}^{-1}\text{)} = (V_t - V_s) \times \frac{19,5}{V_t} \times \frac{1}{P}$$

Avec C (g.kg<sup>-1</sup>) : poids de carbone en g pour 1 kg de sol (g/kg)

V<sub>t</sub> : volume de sel de Mohr 0,5 N en ml pour le témoin

V<sub>s</sub> : volume de sel de Mohr 0,5 N en ml pour l'échantillon

P : prise d'essai en grammes

➤ **Stock de C organique et stock de  $CaCO_3$  du sol**

Les stocks de C organique et de stock de  $CaCO_3$  dans le sol sont quantifiés au moyen des formules suivantes (ELLERT et BETTANY, 1995 In RAKOTONARIVO, 2010) :

$$\text{Stock C} = C \times Da \times (1 - \text{Refus}) \times e \times 0,1 \quad \text{et} \quad \text{Stock CaCO}_3 = \text{CaCO}_3 \times Da \times (1 - \text{Refus}) \times e \times 0,1$$

Avec : Stock C = stock de carbone dans le sol ( $\text{Mg.ha}^{-1}$ )

C = teneur en carbone de l'horizon de sol ( $\text{g.kg}^{-1}$ )

Stock  $\text{CaCO}_3$  = stock de  $\text{CaCO}_3$  dans le sol ( $\text{Mg.ha}^{-1}$ )

$\text{CaCO}_3$  = teneur en  $\text{CaCO}_3$  de l'horizon de sol ( $\text{g.kg}^{-1}$ )

Da = densité apparente du sol ( $\text{g.cm}^{-3}$ )

Refus = éléments grossiers de  $d > 2 \text{ mm}$  (Mg)

e = épaisseur de l'horizon (cm)

Le stock pour une épaisseur de 0 à 30cm est obtenu par la somme des stocks calculés pour chaque épaisseur (0-10cm, 10-20 cm et 20-30 cm) (GRINAND et *al.*, 2009).

### c) Analyses statistiques

La saisie des données brutes, le prétraitement et la mise en forme des résultats ont été effectués avec le logiciel MS EXCEL. Les analyses statistiques ont été faites avec le logiciel XL STAT 08.

La première hypothèse selon laquelle «Des espèces oxalogènes sont présentes dans les régions méridionale et occidentale de Madagascar. » est à vérifier par la réponse des échantillons de biomasse et/ou de sol à l'HCl mais aussi par l'existence éventuelle d'une différence entre pH des sols suivant leur distance des espèces présumées oxalogènes [au pied (0) et à 5 m (5)]. Aussi, les pH 0 et 5 de ces arbres ont été comparés entre eux afin de tester statistiquement, la différence entre leurs moyennes ( $n=62$ ). Le test t de Student a été utilisé pour la comparaison des valeurs du pH 0 et à 5 pour les 2 régions ensembles. Le test ANOVA au seuil  $\alpha=5\%$  a été utilisé pour les comparer dans chaque région.

La deuxième hypothèse qui stipule que « Le potentiel de la voie oxalate-carbonate y est régi par différents facteurs.» est à vérifier à travers ses sous-hypothèses :

SH<sub>21</sub> : « Le potentiel oxalogène de la région méridionale diffère de celui de la région occidentale. »

SH<sub>22</sub> : « Le potentiel oxalogène varie entre espèces. »

SH<sub>23</sub> : « Le potentiel oxalogène varie suivant les dimensions des individus. »

Pour vérifier SH<sub>21</sub>, l'ANOVA s'est portée d'une part sur la comparaison des moyennes entre les teneurs en  $\text{CaCO}_3$  ( $n=51$ ) des deux régions; et d'autre part entre leurs stocks de  $\text{CaCO}_3$  ( $n=17$ ). Le seul facteur étudié était donc la région d'étude (Sakaraha / Morondava).

Pour la vérification de SH<sub>22</sub>, dans un premier temps, le test s'est focalisé sur la comparaison des moyennes entre les teneurs en  $\text{CaCO}_3$  ( $n=51$ ) des différentes espèces puis entre leurs stocks de  $\text{CaCO}_3$  ( $n=17$ ). L'appartenance taxonomique était ici le seul facteur étudié. Ensuite, ce facteur taxonomique a été couplé avec le facteur profondeur (0-10, 10-20, 20-30).

Enfin pour vérifier SH<sub>23</sub>, le test de corrélation, de type Pearson, entre la dimension des arbres (h,  $d_{1,30}$ ) et la teneur et stock de  $\text{CaCO}_3$  a été réalisé.

Les teneurs et stocks de  $\text{CaCO}_3$  comparés dans l'analyse de variance se trouvaient tous au pied des arbres oxalogènes.

## 3.3. Cadre opératoire

Problématique	Hypothèses et Sous-hypothèses		Indicateurs	Méthodes objectives	Procédés
La voie oxalate-carbonate observée dans d'autres pays tropicaux existe-t-elle pour autant à Madagascar ?	H <sub>1</sub> : Des espèces oxalogènes sont présentes dans les régions méridionale et occidentale de Madagascar.		<ul style="list-style-type: none"> <li>Liste des espèces à potentiels d'oxalate présentes à Madagascar</li> <li>Aire de répartition de ces espèces à Madagascar</li> </ul>	Déterminer : les espèces à potentiels d'oxalate déjà trouvées dans d'autres pays. celles qui existent à Madagascar et leurs aires de répartition respectives.	Etude bibliographique
			<ul style="list-style-type: none"> <li>Photos de sols/arbre avec trace visible d'oxalate de calcium</li> <li>Effervescence après test avec HCL</li> <li>Valeur du pH</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vérifier la présence de la voie d'oxalate de calcium chez les espèces potentielles désignées dans les 2 milieux d'étude</li> <li>Comparer les pH au pied et à 5 m des arbres oxalogènes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Entretiens</li> <li>Etude bibliographique</li> <li>Etude pédologique</li> <li>Tests statistiques (test t de Student et ANOVA)</li> </ul>
	H <sub>2</sub> : Le potentiel de la voie oxalate-carbonate y est régi par différents facteurs.	Le potentiel oxalogène de la région méridionale diffère de celui de la région occidentale.	Teneur et stock en CaCO <sub>3</sub> du sol des espèces oxalogènes dans les 2 régions	<ul style="list-style-type: none"> <li>Déterminer la teneur et le stock en CaCO<sub>3</sub> dans les 2 régions</li> <li>Comparer</li> </ul>	Tests statistiques (ANOVA)
		Le potentiel oxalogène varie entre espèces oxalogènes	Teneur et stock en CaCO <sub>3</sub> du sol des espèces oxalogènes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Déterminer la teneur et le stock en CaCO<sub>3</sub> des espèces oxalogènes</li> <li>Comparer</li> </ul>	Tests statistiques (ANOVA)
		Le potentiel oxalogène varie suivant les dimensions des individus	Existence de relation entre teneur, stock en CaCO <sub>3</sub> du sol et d <sub>1,30</sub> , h des individus	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mesurer les d<sub>1,30</sub> et h des arbres oxalogènes</li> <li>Tester l'existence d'une corrélation entre ces variables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inventaire forestier</li> <li>Test de corrélation de type Pearson</li> </ul>

## **PARTIE 3 : RESULTATS**

---

## PARTIE 3 : RESULTATS

### **Chapitre 1 : ESPECES OXALOGENES DES REGIONS MERIDIONALE ET OCCIDENTALE DE MADAGASCAR**

#### **1.1. Espèces oxalogènes existant à Madagascar**

34 essences forestières issues de 29 genres ont été identifiées dans des pays tropicaux comme étant oxalogènes. Ils sont répartis dans 11 familles dont celle des MORACEAE, FABACEAE, MELIACEAE, STERCULIACEAE, BURSERACEAE, BOMBACACEAE, IRVINGIACEAE, OCHNACEAE, PERICOPIDEAE, TILIACEAE et COMBRETACEAE (Tableau 1).

Bien qu'appartenant à des familles et à des genres différents, ces essences forestières oxalogènes ont en commun la présence de forme d'oxalate ou de carbonate de calcium dans le bois. Ceux-ci peuvent se retrouver dans ces espèces sous forme de cristaux, de cystolithes ou de raphides. La famille des FABACEAE, qui regroupe près de la moitié d'entre eux, et plus distinctement la sous-famille des CESALPINIOÏDEAE, se caractérise d'ailleurs par « une grande fréquence de cristaux d'oxalate de calcium en chaînes axiales dans le parenchyme des bois » (NORMAND et PAQUIS, 1976). En outre, toutes ces espèces oxalogènes sont susceptibles de faire des symbioses mychoriziennes, le type de symbiose concernée étant en général la symbiose endomycorizienne (KHASA, FURLAN et LUMANDE, 1990 ; NEWMAN et REDDELL, 1987 In ONGUENE AWANA, 1999). Cette mychorization se traduit par une certaine rusticité de l'espèce et par son aptitude à pousser et à se développer dans des milieux à conditions écologiques extrêmes.

Parmi les espèces décrites dans la littérature comme étant oxalogènes, seules 5 espèces existent à Madagascar. Ce sont : *Acacia mangium* (FABACEAE - MIMOSOÏDEAE), *Dalbergia maritima* (FABACEAE - FABOIDEAE), *Ceiba pentandra* (BOMBACACEAE), *Dalbergia madagascariensis* (FABACEAE - FABOIDEAE) et *Terminalia superba* (COMBRETACEAE).

Ce nombre s'élève toutefois compte tenu de l'existence d'autres espèces du même genre à Madagascar. 5 autres espèces sont concernées par ceci à savoir *Afzelia spp* (FABACEAE-CAESALPINIOÏDEAE), *Heritiera utilis* (STERCULIACEAE), *Pterygota bequaertii* (STERCULIACEAE), *Xylocarpus spp* (MELIACEAE) et *Canarium spp* (BURSERACEAE) [BLASER et *al.*, (1993) ; COOKE et *al.*, (2009) ; [www.tropicos.org/Project/MADA](http://www.tropicos.org/Project/MADA) (2012)].

Par ailleurs, d'autres espèces ne figurant pas parmi les espèces oxalogènes de la littérature mais connues pour avoir de l'oxalate de calcium ont été considérées comme étant susceptibles de l'être (Tableau 2). L'appartenance de l'espèce à ces 11 familles est un plus, tout comme la rusticité de l'espèce ou encore son aptitude à pousser et à se développer dans des conditions extrêmes où d'autres espèces n'auraient pourtant pas pu s'adapter. Les espèces de cette liste additive sont au nombre de 19.

Au total, l'exploration des espèces oxalogènes malgaches s'est basée sur 29 espèces dont les 10 espèces oxalogènes de la littérature (les N°1, 8, 11, 12, 32 et 2, 7, 19, 30, 34 du tableau 1) et les 19 espèces de la liste additive (Tableau 2).

Tableau 1: Espèces oxalogènes issues de la littérature et celles existant à Madagascar

N°	Nom scientifique	Famille et sous-famille	Existence à M/car (Source)
1	<i>Acacia mangium</i>	FABACEAE (S.f. MIMOSOÏDEAE)	(+) (BLASER et <i>al.</i> , 1993)
2	<i>Afzelia spp</i>	FABACEAE (S.f. CAESALPINIOÏDEAE)	(±) (COOKE et <i>al.</i> , 2009)
3	<i>Amphimas ferrugineus</i>	FABACEAE (S.f. FABOIDEAE)	(-)
4	<i>Baikiaea plurijuga</i>	FABACEAE (S.f. CAESALPINIOÏDEAE)	(-)
5	<i>Bombax costatum</i>	BOMBACACEAE	(-)
6	<i>Brachystegia spp</i>	FABACEAE (S.f. CAESALPINIOÏDEAE)	(-)
7	<i>Canarium schweinfurthii</i>	BURSERACEAE	(±) (www.tropicos.org, 2012)
8	<i>Ceiba pentandra</i>	BOMBACACEAE	(+) (MONTAGNAC, 1960)
9	<i>Ceiba speciosa</i>	BOMBACACEAE	(-)
10	<i>Cylicodiscus gabunensis</i>	FABACEAE (S.f. MIMOSOÏDEAE)	(-)
11	<i>Dalbergia madagascariensis</i>	FABACEAE (S.f. FABOIDEAE)	(+) (www.tropicos.org, 2012)
12	<i>Dalbergia maritima</i>	FABACEAE (S.f. FABOIDEAE)	(+) (NORMAND, 1988)
13	<i>Dalbergia melanoxylon</i>	FABACEAE (S.f. FABOIDEAE)	(-)
14	<i>Detarium senegalense</i>	FABACEAE (S.f. CAESALPINIOÏDEAE)	(-)
15	<i>Distemonanthus benthamianus</i>	FABACEAE (S.f. CAESALPINIOÏDEAE)	(-)
16	<i>Guarea cedrata</i>	MELIACEAE	(-)
17	<i>Guibourtia conjugata</i>	FABACEAE (S.f. CAESALPINIOÏDEAE)	(-)
18	<i>Guibourtia spp</i>	FABACEAE (S.f. CAESALPINIOÏDEAE)	(-)
19	<i>Heritiera utilis</i>	STERCULIACEAE	(±) (www.tropicos.org, 2012)
20	<i>Irvingia gabonensis</i>	IRVINGIACEAE	(-)
21	<i>Lophira alata</i>	OCHNACEAE	(-)
22	<i>Lovoa trichilioides</i>	MELIACEAE	(-)
23	<i>Mansonia altissima</i>	STERCULIACEAE	(-)
24	<i>Microberlinia brazzavillensis</i>	FABACEAE (S.f. CAESALPINIOÏDEAE)	(-)
25	<i>Mildbraediodendron excelsum</i>	FABACEAE (S.f. CAESALPINIOÏDEAE)	(-)
26	<i>Milicia excelsa</i>	MORACEAE	(-)
27	<i>Myroxolon balsamum</i>	FABACEAE (S.f. CAESALPINIOÏDEAE)	(-)
28	<i>Pentaplaris davidsmithii</i>	TILIACEAE	(-)
29	<i>Pericopsis elata</i>	PERICOPIDEAE	(-)
30	<i>Pterygota bequaertii</i>	STERCULIACEAE	(±) (www.tropicos.org, 2012)
31	<i>Terminalia amazonica</i>	COMBRETACEAE	(-)
32	<i>Terminalia superba</i>	COMBRETACEAE	(+) (BLASER et <i>al.</i> , 1993)
33	<i>Triplochiton scleroxylon</i>	STERCULIACEAE	(-)
34	<i>Xylocarpus spp</i>	MELIACEAE	(±) (TOSTAIN, 2010)

S.f. : Sous-famille / (+) : présence / (-) : absence / (±) : autres espèces

Source : ARAGNO et *al.*, 2010 ; Com. pers. VERRECCHIA, 2012

Tableau 2: Autres espèces, existant à Madagascar, susceptibles d'être oxalogènes

N°	Nom scientifique	Famille	Références
35	<i>Acacia albida</i>	FABACEAE	(ZINDLER-FRANK, 1987)
36	<i>Acacia auriculiformis</i>	FABACEAE	(ZINDLER-FRANK, 1987)
37	<i>Anacardium occidentale</i>	ANACARDIACEAE	(OKONKWO et <i>al.</i> , 2010)
38	<i>Azadirachta indica</i>	MELIACEAE	(GOVERNMENT OF INDIA, 1990)
39	<i>Broussonetia greveana</i>	MORACEAE	(LOUPPE, OTENG-AMOAKO et BRINK, 2008)
40	<i>Canarium madagascariensis</i>	BURSERACEAE	(BRINK, 2008)
41	<i>Casuarina equisetifolia</i>	CASUARINACEAE	(NORMAND et PAQUIS, 1976)
42	<i>Cedrelopsis grevei</i>	RUTACEAE	(RAZAFIMAMONJISON, 2007)
43	<i>Dalbergia baroni</i>	FABACEAE	(ZINDLER-FRANK, 1987)
44	<i>Delonix regia</i>	FABACEAE	(ZINDLER-FRANK, 1987)
45	<i>Diospyros gracilipes</i>	EBENACEAE	(NORMAND, SALLENAVE et ROTHE, 1960)
46	<i>Ficus spp</i>	MORACEAE	(PERRIER, AUFFRET VAN DER KEMP et ZONSZAIN, 1997); (PANCRACIO et LAFLAQUIÈRE, 2002)
47	<i>Gmelina arborea</i>	VERBENACEAE	(DAVE et RAO, 1982 In RAO et DAVE, 1984)
48	<i>Khaya madagascariensis</i>	MELIACEAE	(IBRAHIM et <i>al.</i> , 2006)
49	<i>Melia azedarach</i>	MELIACEAE	(RICHTER et DALLWITZ, 2009)
50	<i>Tamarindus indica</i>	FABACEAE	(ZINDLER-FRANK, 1987)
51	<i>Tectona grandis</i>	VERBENACEAE	(RAO et DAVE, 1981 In RAO et DAVE, 1984)
52	<i>Trema orientalis</i>	ULMACEAE	(FAO, 1997)
53	<i>Trilepisium madagascariensis</i>	MORACEAE	(NWOSU, 2011)

## 1.2. Espèces, présumées oxalogènes, explorées dans la zone d'étude

11 espèces issues des tableaux 1 et 2 (N° 1, 8, 32, 34 du tableau 1 et N° 39, 40, 41, 42, 46, 50 et 53 du tableau 2) sont présentes dans la zone d'étude. Mais les *Ficus* y étaient représentés par 4 espèces. En outre, *Casuarina cunninghamiana* (CASUARINACEAE) et *Cordia myxa* (BORAGINACEAE) n'ont été identifiées qu'une fois sur le terrain. Tout ceci a fait augmenter le nombre d'espèces présumées oxalogènes dans la zone d'étude à 16. Néanmoins, 12 espèces seulement ont pu être étudiées à cause de la difficulté d'accessibilité de l'emplacement des espèces N°32, 34 et 53 (Tableau 3).

Sur ces 12 espèces explorées, 2 espèces n'ont pas présenté de traces de calcaire. Ce sont *Acacia mangium* (FABACEAE S.f. MIMOSOÏDEAE) et *Cedrelopsis grevei* (RUTACEAE). Les 10 autres, qui ont donné de l'effervescence à l'HCl, et peuvent être retenues comme ayant réellement ce potentiel sont : *Ficus marmorata*, *Ficus polita*, *Ficus sycomorus*, *Ficus sp* (MORACEAE), *Casuarina cunninghamiana*, *Casuarina equisetifolia* (CASUARINACEAE), *Tamarindus indica* (FABACEAE S.f. CAESALPINIOÏDEAE), *Ceiba pentandra* (BOMBACACEAE), *Cordia myxa* (BORAGINACEAE) et *Broussonetia greveana* (MORACEAE).

*B. greveana*, *F. polita* et *F. sycomorus* existaient à la fois dans les deux régions.



Tableau 3: Espèces explorées dans la zone d'étude

Région	Espèces		Dimensions			Trace de calcaire		
	NS et Répétition		N° arbre	d <sub>1,30</sub> (cm)	h (m)	Biomasse	Sol	Observations
Sakaraha	<i>Acacia mangium</i> (FABACEAE)	1	1	45	13	-	-	
	<i>Broussonetia greveana</i> (MORACEAE)	2	1	45	15	-	-	
			2	36	18	-	-	
	<i>Cedrelopsis grevei</i> (RUTACEAE)	2	1	30	15	-	-	
			2	20	9	-	-	
	<i>Ficus marmorata</i> (MORACEAE)	3	1	72	11	-	-	
			2	78	19	+	-	
			3	36	10	+	-	
	<i>Ficus polita</i> (MORACEAE)	3	1	103	20	+	+	Effervescence en surface
			2	88	18	+	+	Effervescence jusqu'à 30cm
			3	110	11	+	+	Effervescence en surface
	<i>Ficus sycomorus</i> (MORACEAE)	3	1	36 / 39	7	+	+	Effervescence jusqu'à 30cm
			2	40 / 41	7	+	-	
			3	36 / 45	6	-	-	
	<i>Casuarina cunninghamiana</i> (CASUARINACEAE)	3	1	38	18	+	+	Caillou calcaire ; Effervescence jusqu'à 30cm
			2	33	15	+	+	Caillou calcaire ; Effervescence jusqu'à 20cm
			3	25	6	+	+	Caillou calcaire; Effervescence en surface
Morondava	<i>F. sycomorus</i> (MORACEAE)	2	1	34 / 25	7 / 5	+	-	
			2	35	6	+	-	
	<i>B.greveana</i> (MORACEAE)	1	1*	38	9	+	-	
	<i>Ficus sp</i> (MORACEAE)	2	1	100	13	+	-	
			2	120	17	+	+	Effervescence en surface
	<i>Tamarindus indica</i> (CESALPINACEAE)	3	1	78	18	+	+	Effervescence jusqu'à 30cm
			2	63	22	+	+	Effervescence jusqu'à 30cm
			3	52	16	+	+	Effervescence en surface
	<i>Casuarina equisetifolia</i> (CASUARINACEAE)	3	1*	32 / 17	8/4	+	+	Effervescence en surface
			2	55	7	+	+	Effervescence jusqu'à 20cm
			3	53	9	+	+	Effervescence en surface
	<i>Ceiba pentandra</i> (BOMBACACEAE)	3	1	120	12	+	+	Effervescence en surface
			2*	180	13	+	+	Effervescence jusqu'à 20cm
			3	150	30	+	+	Effervescence en surface
	<i>Cordia myxa</i> (BORAGINACEAE)	2	1	24/19/21	6/6/6	+	-	
			2	61	6	+	-	
	<i>F. polita</i> (MORACEAE)	1	1	21/25/14	7/ 7/ 7	+	-	

Note :

(\*) : Bois mort /chablis et non arbre sur pied

 : Individus dont les échantillons de sols et/ou de biomasse ont été analysés en laboratoire

Les caractéristiques dendrologiques, écologiques et sylvicoles de ces espèces explorées sont données en Annexe 7.

### 1.2.1. Espèces présentant le potentiel d'oxalate de calcium

#### a) *Ficus spp*

Les quatre (4) espèces de *Ficus* rencontrées dans la zone d'étude ont toutes présenté des traces de calcaire mais à des degrés d'effervescence différents (à peine visible, visible, persistante) suivant l'espèce considérée.

##### ➤ *Ficus marmorata* (Nonoka)

Trois (3) pieds de *Ficus marmorata* (MORACEAE) ont été étudiés à Sakaraha. Tous les trois ont présenté des traces de calcaire sur les parties dégradées (Photo 7 b) du bois mais aucune effervescence n'a été observée au niveau du sol.



Photo 6: *Ficus marmorata* (a), effervescence sur partie dégradée du bois sur pied (b)

##### ➤ *Ficus sp* (Fihamy)

Deux (2) pieds de *Ficus sp* (MORACEAE) ont été étudiés dans la forêt de Kirindy à Morondava. Ils ont tous présenté des traces de calcaire au niveau de l'arbre (Photo 10b) mais seul le second pied a produit de l'effervescence à peine visible au niveau du sol.

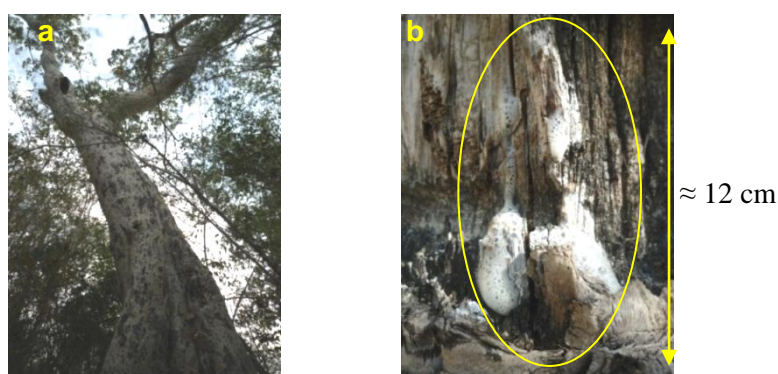


Photo 7: *Ficus sp* (a) ; Effervescence sur bois dégradé (b)

##### ➤ *Ficus polita* (Mandresy)

Trois (3) pieds de *Ficus polita* (MORACEAE) ont été étudiés à Sakaraha dans la lisière de la forêt de Zombitse et dans la savane arborée adjacente. Ces arbres ont présenté des traces de calcaire au niveau des parties dégradées du bois sur pied, du bois mort et du sol (Photo 8 b et c). A Morondava, un

seul pied de *Ficus polita* a été rencontré dans un jardin de case à Marofandilia. Il a également présenté des traces de calcaire au niveau des parties dégradées du bois sur pied.

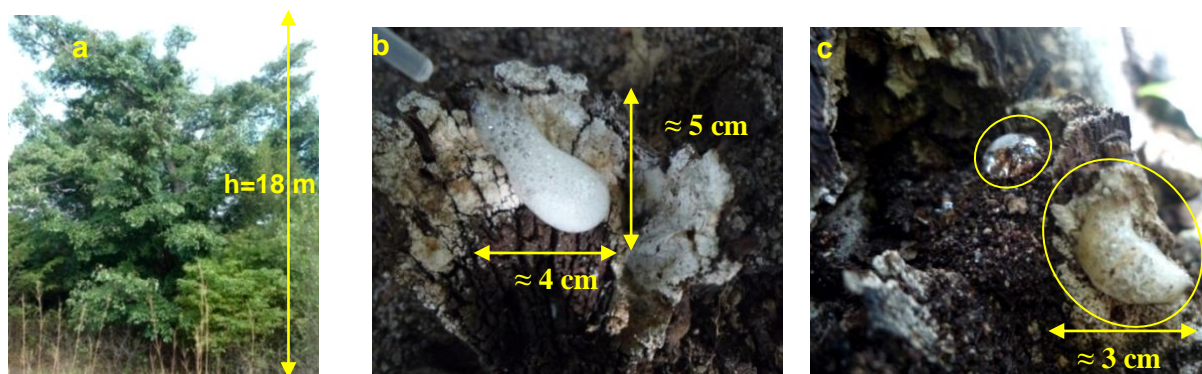


Photo 8: *Ficus polita* (a) ; Effervescence sur bois dégradés (b) et au niveau du sol (c)

➤ ***Ficus sycomorus* (Adabo)**

Le pied de *F. sycomorus* (MORACEAE) étudié dans la savane arborée de Sakaraha a présenté de l'effervescence persistante tant au niveau du bois qu'au niveau du sol (Photos 9 b et c).

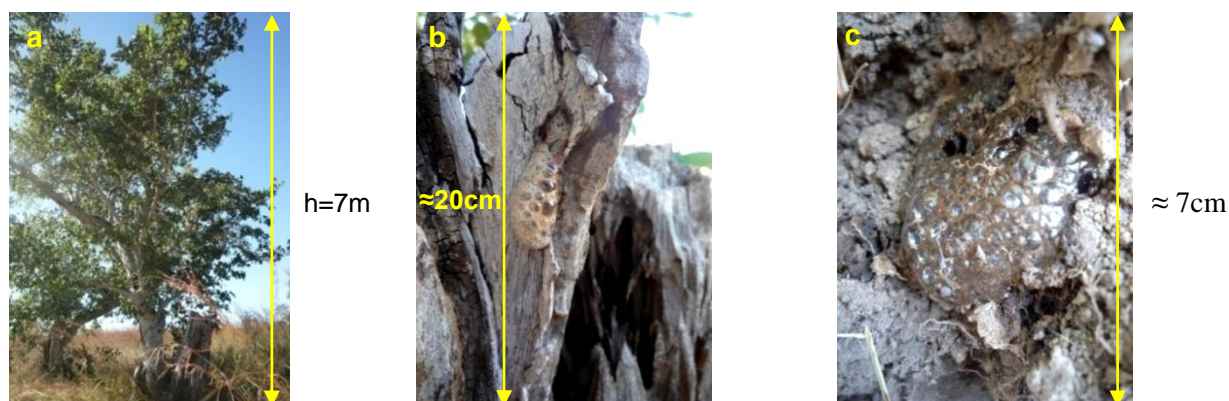


Photo 9: *Ficus sycomorus* (a) ; effervescence sur bois dégradé (b) et au niveau du sol (c)

**b) *Casuarina* spp**

*Casuarina equisetifolia* et *Casuarina cunninghamiana* sont les deux (2) espèces de filao qui existent à Madagascar (Photo 11). *Casuarina equisetifolia* est une espèce autochtone qui se rencontre sur la côte Est, Ouest et Sud de l'île. *Casuarina cunninghamiana* est une espèce introduite. Elle est plus apparentée aux hautes-terres (CHAUVET, 1965).



Photo 10: *Casuarina equisetifolia* (a) et *Casuarina cunninghamiana* (b)



➤ *Casuarina equisetifolia* (Akao)

Trois (3) pieds de *C. equisetifolia* ont été étudiés à Ampataka (Morondava). Les effervescences ont été plus nettes au niveau de la litière (Photo 13), des débris de bois encore individualisable et des premiers horizons du sol



Photo 11: *C. equisetifolia* : effervescence sur un fragment de bois (a) et au niveau du sol (b)

➤ *Casuarina cunninghamiana* (Filao)

Trois (3) pieds de *C. cunninghamiana* ont été étudiés dans la station de reboisement de Sakaraha. Ils ont donné de l'effervescence au niveau du bois sur pied (Photo 12a). Le sol présente des taches blanchâtres, localisées autour des racines, et des cailloux calcaires qui donnent de l'effervescence persistante au contact avec l'HCl (Photo 12b et c). Lesdits cailloux calcaires sont de couleur blanchâtre. Ils sont très durs et ne dépassent pas les 5 cm de longueur. Leur teneur en  $\text{CaCO}_3$  est d'environ 36 %.



Photo 12 : *C. cunninghamiana* : effervescence sur le bois (a) et sur caillou calcaire (c); caillou calcaire (b)

c) *Tamarindus indica* (Kily)

Trois (3) pieds de *T. indica* (FABACEAE Sous-famille CESALPINIACEAE) ont été étudiés dans la forêt de Kirindy-Morondava. Ils ont donné de l'effervescence persistante au niveau de l'écorce de l'arbre, de la litière (Photos 14b et c) et des premiers horizons du sol.

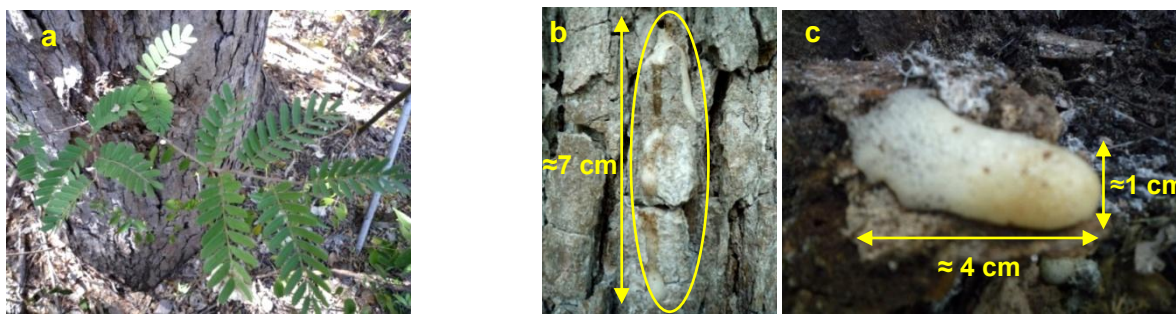


Photo 13: Pied de *Tamarindus indica* (a) ; effervescence sur l'écorce (b,c)

**d) *Ceiba pentandra* (Kapoaka)**

Trois (3) pieds de *Ceiba pentandra* (BOMBACACEAE) ont été étudiés dans des jardins de case à Morondava. Ils ont donné de l'effervescence persistante au niveau du bois dégradé de l'arbre et du sol (Photo 15 c et d).

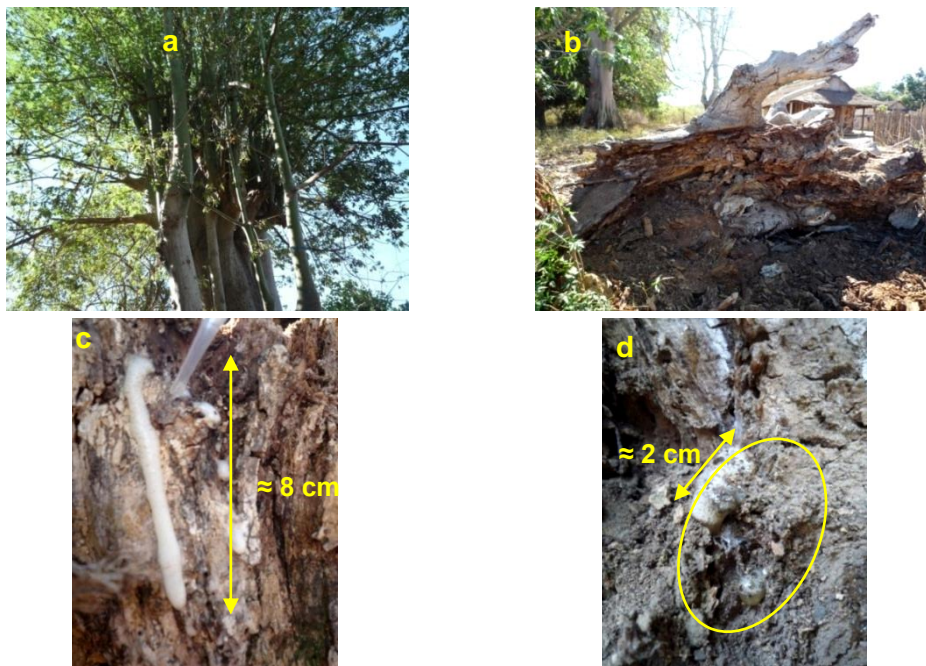


Photo 14: *Ceiba pentandra* sur pied(a) ; chablis (b) ; effervescence sur bois mort (c) et sur le sol (d)

**e) *Cordia myxa* (Gonda)**

Deux (2) pieds de *Cordia myxa* (BORAGINACEAE) ont été étudiés à Morondava. Ils n'ont donné de l'effervescence qu'au niveau de l'écorce (Photo 16b).

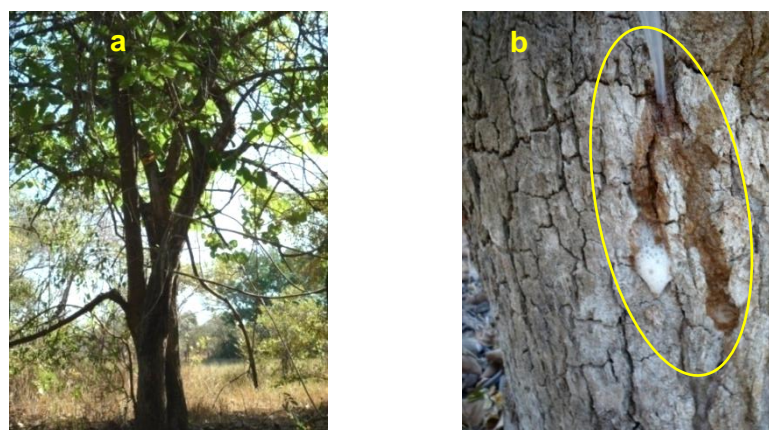


Photo 15 : *Cordia myxa* (a) ; effervescence sur l'écorce (b)

**f) *Broussonetia greveana* (Vory)**

*Broussonetia greveana* (MORACEAE) a été étudiée à Sakaraha comme à Morondava. Deux (2) pieds de cette espèce ont fait l'objet de prélèvement de sols dans le PN Zombitse-Vohibasia. Mais aucune trace de calcaire n'a été trouvée dans le sol comme dans la biomasse. Toutefois, dans la forêt de Kirindy à Morondava, un chablis de cette espèce a présenté des traces de calcaire au niveau du tronc (Photos 6b) et des racines. Des traces de calcaire dans le sol n'ont pourtant pas été observées.





Photo 16: *Broussonetia greveana* : chablis(a), effervescence sur le tronc (b)

### **g) Autres espèces**

Deux (2) espèces explorées à Morondava semblent avoir le potentiel oxalogène. Ce sont *Quivisianthe papinae* (MELIACEAE) et *Dalbergia greveana* (FABACEAE - PAPILIONACEAE). *Q. papinae* n'a donné de l'effervescence au contact de l'HCl qu'en quelques points de l'écorce de l'arbre (Photo 17b). Le bois de *D. greveana* n'a présenté qu'une légère effervescence.

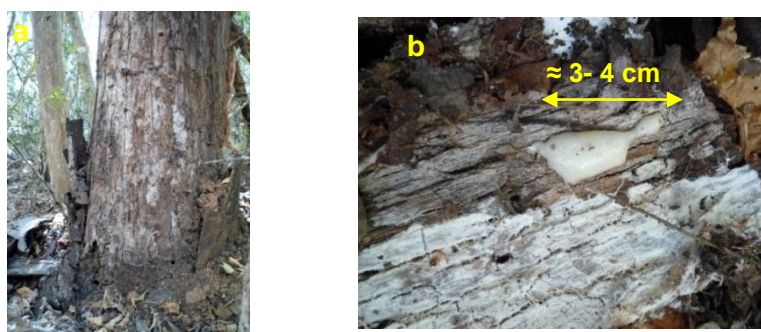


Photo 17: Tronc de *Quivisianthe papinae* (a) ; effervescence sur écorce (b)

### **1.2.2. Espèces ne présentant pas le potentiel d'oxalate de calcium**

#### **a) *Acacia mangium***

Un seul pied d'*Acacia mangium* (FABACEAE S.f. MIMOSOÏDEAE) a été étudié à Sakaraha. L'arbre a été planté dans un jardin de case du village d'Andranovory Betaly situé à près de 6 km au sud-ouest de Zombitse sur les abords de la RN7. Bien qu'appartenant à la liste des espèces oxalogènes de la littérature, *Acacia mangium* n'a pas donné la moindre trace de calcaire que ce soit sur l'arbre ou dans le sol.

#### **b) *Cedrelopsis grevei* (Katrafay)**

Deux (2) pieds de *Cedrelopsis grevei* (RUTACEAE) ont été étudiés à Sakaraha dans le PN Zombitse-Vohibasia. Aucune trace de calcaire n'a été trouvée. Une prospection conduite dans la forêt de Kirindy à Morondava a abouti au même résultat.

#### **c) Autres espèces testées**

*Anacardium occidentale* (ANACARDIACEAE), *Azadirachta indica* (MELIACEAE) et *Gmelina arborea* (VERBENACEAE) ont été testées à Morondava sans donner la moindre trace d'effervescence dans la biomasse comme dans le sol.

### 1.3. pH eau

Les valeurs du pH eau du sol au pied et à 5 m des espèces oxalogènes étudiées sont données en Annexe 8. Elles varient entre 5,5 et 8 pour l'ensemble des arbres oxalogènes des deux régions alors qu'au niveau des sols témoins à 5 m de ces arbres, le pH oscille entre 5 et 6. Le maximum a été atteint au pied de *Ceiba pentandra* 2 entre une profondeur de 0-10 cm alors que pour cette même profondeur, *Ficus polita* 3 et *Ficus* sp n'ont donné que 5,5.

Le pH moyen des sols prélevés à Sakaraha ( $5,86 \pm 0,54$ ) et celui des sols à Morondava ( $6,03 \pm 0,73$ ) ne présentent pas de différence significative.

Pour l'ensemble des deux régions, une différence significative a été notée entre le pH des sols au pied des arbres oxalogènes [ $6,3 \pm 0,6$  ( $n = 32$ )] et celui à 5m [ $5,5 \pm 0,3$  ( $n = 33$ )] ( $p$ -value  $< 0.0001$ ). Cette différence reste valable même au niveau de chaque région. Effectivement, le pH du sol au pied des espèces oxalogènes à Sakaraha ( $6,15 \pm 0,50$ ) diffère significativement du pH du sol à 5m ( $5,54 \pm 0,36$ ) ( $p$ -value = 0,001). A Morondava, la différence entre le pH du sol au pied ( $6,47 \pm 0,77$ ) et celui à 5m ( $5,60 \pm 0,31$ ) est aussi significative ( $p$ -value = 0,0001).

Au pied comme à 5m, le pH du sol dans les deux régions diminue suivant la profondeur (0-10 ; 10-20) (Tableau 4). Toutefois, il n'existe pas de différence significative entre les pH des sols de ces différentes profondeurs.

Tableau 4: pH du sol selon la région, la distance et la profondeur

Région	Distance	Profondeur	pH		
			$\mu$	$\sigma$	Groupe
Sakaraha	0 m	0-10	6,25	0,49	<b>A</b>
		10-20	6,07	0,53	<b>A</b>
	5 m	0-10	5,58	0,34	a'
		10-20	5,5	0,41	a'
Morondava	0 m	0-10	6,7	0,79	<b>a</b>
		10-20	6,18	0,7	<b>a</b>
	5 m	0-10	5,72	0,35	+
		10-20	5,5	0,25	+

$\mu$ : moyenne ;  $\sigma$ : écart-type

### 1.4. Aspects phytosociologiques

#### 1.4.1. Structure floristique

Les listes complètes des espèces floristiques rencontrées dans les deux milieux d'étude sont présentées en Annexe 9. A Sakaraha, la liste floristique est constituée par 65 espèces dont 59 espèces connues réparties dans 55 genres et 35 familles. A Morondava, elle fait état de 47 espèces dont 46 espèces connues réparties dans 40 genres et 31 familles.

Parmi les différents types de station suivant le mode d'usage des terres, les forêts denses sèches (FDS) sont généralement les plus diversifiées (CM= 1/3 pour chaque région). Les savanes arbustives

(SA) le sont aussi, notamment à Sakaraha (CM = ½) où elles sont deux fois plus diversifiées qu'à Morondava. Par contre, dans les jardins de case, une tendance à la monospécificité est observée chez les espèces oxalogènes. Cette tendance se dissipe un peu au sein des peuplements artificiels. Toutefois, les espèces oxalogènes n'y sont pratiquement pas dotées d'espèces accompagnatrices (Tableau 5).

A Sakaraha, les FDS sont plus abondantes en FABACEAE, en particulier CESALPINIACEAE et MIMOSACEAE. En termes de familles dominantes, une certaine similarité est perceptible entre les FDS et les SA de cette région. Effectivement, la famille des SALICACEAE, celles des PHYLLANTHACEAE et des MORACEAE qui figurent parmi les principales familles dans les FDS le sont aussi dans les SA. La famille des TILIACEAE, particulièrement abondante dans les FDS de Morondava, s'observe également à Sakaraha.

**Tableau 5:** Composition floristique des différents types de station suivant le mode d'usage des terres

		Nombre d'espèces	Nombre de genres	Nombre de familles	Principales familles	CM
<b>Sakaraha</b>	FDS	48 sur 549,5 m <sup>2</sup>	42	30	CESALPINIACEAE, MELIACEAE COMBRETACEAE, SALICACEAE, APOCYNACEAE, PHYLLANTHACEAE, RUTACEAE, MORACEAE, TILIACEAE, MIMOSACEAE	1/3
	SA	23 sur 392,5 m <sup>2</sup>	21	18	MORACEAE, PHYLLANTHACEAE, CELASTRACEAE, SPHAEROSPALACEAE, SALICACEAE	1/2
	FA	4 sur 235,5 m <sup>2</sup>	4	4	CASUARINACEAE	1/6
	JDC	1 sur 78,5 m <sup>2</sup>	1	1	MIMOSACEAE	1
<b>Morondava</b>	FDS	31 sur 471 m <sup>2</sup>	27	22	TILIACEAE, RUBIACEAE, EBENACEAE, LOGANIACEAE	1/3
	SA	17 sur 392,5 m <sup>2</sup>	16	16	BORAGINACEAE, RHAMNACEAE	1/4
	FA	1 sur 235,5 m <sup>2</sup>	1	1	CASUARINACEAE	1/7
	JDC	3 sur 235,5 m <sup>2</sup>	3	3	BOMBACACEAE	3/4

FDS : Forêt Dense Sèche / SA : Savane Arbustive / FA : Forêt Artificielle / JDC : Jardin De Case

L'interprétation de ces résultats préliminaires doit cependant être faite avec beaucoup d'attention, d'une part en raison de la différence des surfaces inventoriées dans une même catégorie de mode d'usage des terres et d'autre part en raison de l'exigüité de la surface considérée.

#### 1.4.2. Espèces accompagnatrices

A Sakaraha, les espèces accompagnatrices des individus oxalogènes sont surtout *Bussea perrieri* (FABACEAE Sous-famille CESALPINIACEAE) (hazokataky), *Bivinia jalbertii* (SALICACEAE) (tanatananala) et *Securinega perrieri* (PHYLLANTHACEAE) (forofoky). En général, elles ne sont fréquentes qu'au niveau des espèces explorées dans la FDS.



A Morondava, ce sont *Grewia picta* ou sely (TILIACEAE), *Cordia myxa* (BORAGINACEAE) (gonda) et *Tamarindus indica* (FABACEAE Sous-famille CESALPINIACEAE) (kily) qui sont les plus fréquentes. *Cordia myxa* est plus associée aux espèces oxalogènes présentes dans les SA alors que *Grewia picta* et *Tamarindus indica* le sont aussi bien en FDS qu'en SA.

Le tableau de « présence-absence » des espèces accompagnatrices dans les placettes relatives à chaque arbre oxalogène exploré dans chaque région est donné en Annexe 10.

### 1.4.3. Structure spatiale

Dans les 2 régions, les arbres oxalogènes semblent être plus associés à des individus de petite taille voire des régénérations naturelles (Figures 3 et 4). La majorité des essences accompagnatrices ont en effet une hauteur inférieure à 8 m et un diamètre inférieur à 10 cm dans le cas des FDS. Les arbres oxalogènes, qui dépassent largement cette taille (Tableau 3 de la page 22), figurent donc dans la strate supérieure.

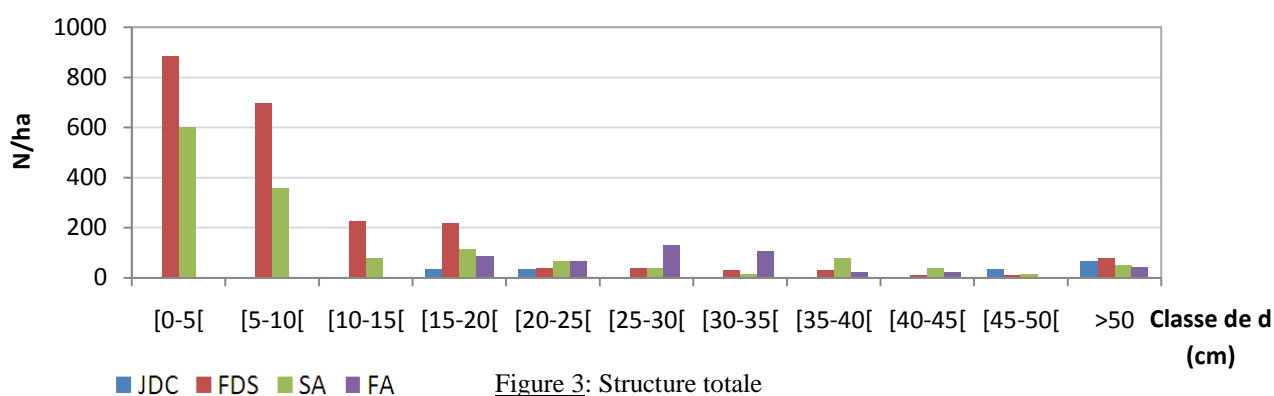


Figure 3: Structure totale

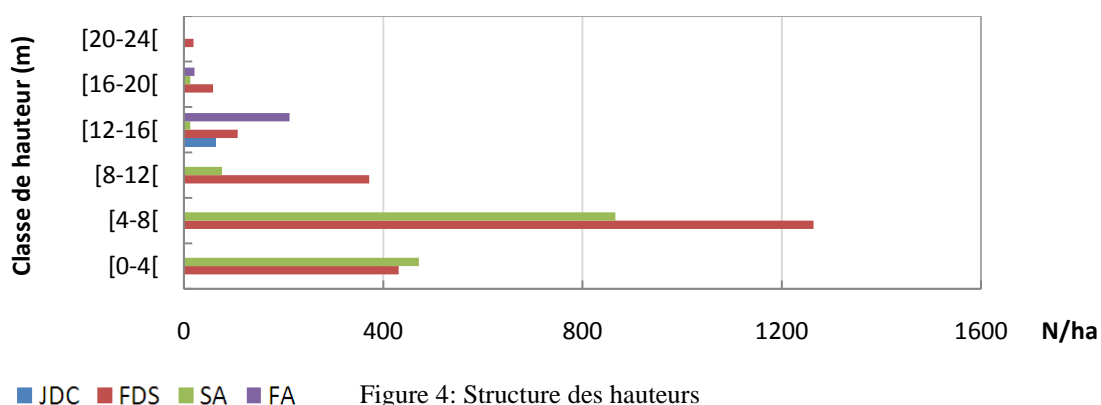


Figure 4: Structure des hauteurs

## **Chapitre 2 : DIFFERENTS FACTEURS SUSCEPTIBLES D'INFLUENCER LA VOIE OXALATE-CARBONATE**

### **2.1. Type de sols rencontrés**

Six (6) types de sol ont été rencontrés au niveau des points de prélèvements. Ce sont : les sols ferrugineux jaune-rouges, les sols ferrugineux rouges, les sols ferrugineux lessivés, les sols ferrugineux lessivés à tendance podzolique, les sols hydromorphes et les sols hydromorphes à caractère vertique.

#### **2.1.1. Sols ferrugineux jaune-rouges**

Les sols de type ferrugineux jaune-rouges (sable roux) ont été rencontrés dans les deux régions.

A Sakaraha, ces sols sont constitués par:

- un horizon humifère A sur 20 cm de profondeur. De couleur noire, cet horizon se reconnaît par sa texture sableuse et sa structure particulaire. Il comprend deux sous-horizons : AO riche en matière organique fraîche et A1 riche en matière organique moyennement décomposée en humus.
- un horizon B, situé entre 20 et 60 cm de profondeur, de texture sablo-argileuse et de structure particulaire. Il est divisé en sous-horizons I-B et II-B qui se distinguent par leur couleur. En effet, I-B, limité entre 20- 40 cm, est de couleur jaune-rouge alors que II-B, situé entre 40 à 60cm de profondeur, est de couleur rouge.

Les espèces oxalogènes à Sakaraha concernées par ce type de sol sont : *Ficus marmorata* 2, 3 et *Ficus sycomorus* 3.

A Morondava, ces sols possèdent :

- un horizon A, qui peut aller jusqu'à 25 cm de profondeur. Sa couleur généralement noire en surface devient brune en profondeur. Le sol possède une texture sablo-argileuse et une structure particulaire. Les deux sous-horizons AO et A1 restent identifiables.
- un horizon B, de couleur rouge ou jaune-rouge, situé entre 25 et 60 cm de profondeur. Cet horizon moyennement compact a une texture sablo-argileuse et une structure massive.

*Ficus polita*, 1 et *Ficus sp* 1. sont les espèces concernées par ce type de sol à Morondava.



**Photo 18:** Sols ferrugineux jaune-rouges à Sakaraha (a) et à Morondava (b)

### 2.1.2. Sols ferrugineux lessivés

Les sols ferrugineux lessivés aussi ont été rencontrés dans les deux régions d'étude.

A Sakaraha, ces sols ont été observés sous *Ficus sycomorus* 1 et 2, et sous *Casuarina cunninghamiana* 1,2 et 3. Ils possèdent :

- un horizon A, jusqu'à 15 cm de profondeur. Cet horizon de couleur noire grisâtre a une texture sableuse au ras du sol et argilo-sableuse en profondeur. Sa structure est particulière et sa compacité est faible. Les sous- horizons AO et A1 y sont aussi identifiables.
- un horizon B qui se trouve entre 15 et 60cm de profondeur. Cet horizon très compact a une texture argilo-sableuse et une structure grumeleuse. Il est divisé en trois sous-horizons : I-B, II-B et III-B qui sont respectivement de couleur brune, noire et rouge.

A Morondava, *Ficus sp* 2, *Ceiba pentandra* 1, 2,3, *Tamarindus indica* 1, 2, 3, et *Cordia myxa* 1, 2 étaient sur ce type de sol. Les sols ferrugineux lessivés sont constitués par :

- un horizon A, jusqu'à environ 25 cm de profondeur. De couleur jaune en surface et brune en profondeur, cet horizon a une texture argilo-sableuse et une structure particulière. Il est moyennement compact. Les sous- horizons AO et A1 y sont aussi identifiables.
- un horizon B, situé entre 25 et 60 cm de profondeur. Il a une très forte compacité et une texture argilo-sableuse. Cet horizon B est divisé en deux sous-horizons qui se différencient par leur couleur et leur structure. Le sous-horizon I-B, de couleur grise, est caractérisé par une structure grumeleuse. Le sous-horizon II-B, situé plus en profondeur, se démarque par une couleur noire et une structure massive.



Photo 19: Sols ferrugineux lessivés à Sakaraha (a) et à Morondava (b)

### 2.1.3. Sols ferrugineux lessivés à tendance podzolique

Ces sols n'ont été rencontrés qu'à Sakaraha, sous la forêt sèche de Zombitse.



Photo 20: Sols ferrugineux lessivés à tendance podzolique sous forêt sèche de Zombitse

Ils possèdent :

- un horizon humifère A, qui peut atteindre jusqu'à 20 cm de profondeur. Cet horizon, de couleur noire, a une texture sableuse et une structure particulière. Il comprend également un sous-horizon AO riche en matière organique fraîche et sous-horizon A1 riche en matière organique moyennement décomposée en humus.
- un horizon éluvial E, entre une profondeur de 20 à 60 cm, qui est aussi à structure particulière et à texture sableuse mais de teinte grise.

Les arbres concernés par ce type de sol à Sakaraha sont : *Broussonetia greveana* 1 et 2, *Cedrelopsis grevei* 1 et 2, *Ficus marmorata* 1, *Ficus polita* 1 et 2.

### 2.1.4. Sols ferrugineux rouges

Les sols ferrugineux rouges ont été observés à Sakaraha sous *Ficus polita* 3 et *Acacia mangium*.



Photo 21: Sols ferrugineux rouge à Sakaraha

Ils sont constitués par :

- un horizon A limité à 20 cm de profondeur. Cet horizon est de couleur noire, à texture sablo-argileuse, et à structure particulière. Les sous- horizons AO, riche en matière organique fraîche, et A1, riche en matière organique moyennement décomposée en humus y sont aussi identifiables.
- un horizon B qui se trouve entre 20 et 60cm de profondeur. Il a une couleur rouge, une texture argilo-sableuse et une structure massive.



### 2.1.5. Sols hydromorphes

Les sols hydromorphes n'ont été rencontrés qu'à Morondava, avec *Casuarina equisetifolia* 1, 2 et 3.

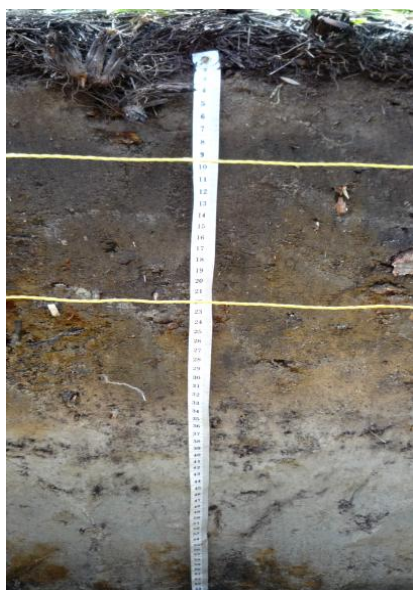


Photo 22: Sols hydromorphes à Morondava

Ils possèdent :

- un horizon A, limité jusqu'à 25 cm de profondeur. Il a une couleur grise noirâtre et une texture argilo-sableuse. Sa structure est grumeleuse et il a une très forte compacité. Les sous- horizons AO et A1 y sont aussi identifiables.
- un horizon B qui se trouve entre 25 et 60cm de profondeur. Cet horizon est très compact. Il possède une texture argilo-sableuse et une structure grumeleuse. Il est divisé en trois sous-horizons : I-B, II-B et III-B qui sont respectivement rouge, blanche et rouge.

### 2.1.6. Sols hydromorphes à caractère vertique

Les sols hydromorphes à caractère vertique n'ont été rencontrés qu'à Morondava, avec *Ficus sycamorus* 1 et 2.



Photo 23: Sols hydromorphes à caractère vertique de Morondava

Il est composé par :

- un horizon A qui peut atteindre jusqu'à environ 40cm de profondeur. Il a une couleur grise, une texture argileuse et une structure très massive. Cet horizon est très compact. Les sous- horizons AO et A1 y sont aussi à distinguer.
- un horizon B se trouvant entre 40 et 60 cm de profondeur. Il a une très forte compacité et une texture argileuse. Cet horizon de couleur blanchâtre est caractérisé par une structure massive.

## 2.2. Compartiment sol

### 2.2.1. Caractéristiques généraux des propriétés des sols étudiés

#### a) Teneur en $\text{CaCO}_3$

Les teneurs en  $\text{CaCO}_3$  des sols de Morondava ( $7,80 \pm 19,62 \text{ g.kg}^{-1} \text{ A}$ ) et de Sakaraha ( $3,40 \pm 5,03 \text{ g.kg}^{-1} \text{ A}$ ) sont pratiquement homogènes ( $p\text{-value} = 0,17$ ).

A Sakaraha, la teneur en  $\text{CaCO}_3$  du sol au pied des arbres oxalogènes ( $5,73 \pm 6,46 \text{ g.kg}^{-1} \text{ a}$ ) diffère significativement de celle à 5m ( $1,43 \pm 0,78 \text{ g.kg}^{-1} \text{ b}$ ) ( $p\text{-value} = 0,004$ ). Il en est de même à Morondava puisque les teneurs en  $\text{CaCO}_3$  au pied ( $14,17 \pm 26,55 \text{ g.kg}^{-1} \text{ a'}$ ) et à 5m ( $2,08 \pm 1,68 \text{ g.kg}^{-1} \text{ b'}$ ) ne sont pas dans le même groupe ( $p\text{-value} = 0,01$ ).

A Morondava, la teneur en  $\text{CaCO}_3$  du sol au pied des arbres oxalogènes diminue suivant la profondeur. En effet, les horizons 0-10 ( $34,77 \pm 38,88 \text{ g.kg}^{-1} *$ ) sont significativement différents des horizons 10-20 ( $3,97 \pm 2,98 \text{ g.kg}^{-1} **$ ) et 20-30 ( $3,76 \pm 6,63 \text{ g.kg}^{-1} **$ ). Par contre, à Sakaraha, aucune différence significative n'a été observée entre les différentes profondeurs.

#### b) Teneur en C

Les teneurs en C des sols de Morondava ( $26,47 \pm 36,40 \text{ g.kg}^{-1} \text{ X}$ ) et de Sakaraha ( $35,57 \pm 37,71 \text{ g.kg}^{-1} \text{ X}$ ) aussi sont pratiquement homogènes ( $p\text{-value} = 0,24$ ).

Leur variation suivant la distance est négligeable quelque soit la région considérée. Effectivement, la teneur en C du sol au pied des espèces oxalogènes à Sakaraha ( $46,27 \pm 47,53 \text{ g.kg}^{-1} \text{ i}$ ) et celle à 5m ( $26,76 \pm 18,95 \text{ g.kg}^{-1} \text{ i}$ ) ne sont pas significativement différentes ( $p\text{-value} = 0,09$ ). Ceci reste valable à Morondava où les teneurs en C au pied ( $33,40 \pm 46,76 \text{ g.kg}^{-1} \text{ O}$ ) et à 5m ( $16,39 \pm 21,43 \text{ g.kg}^{-1} \text{ O}$ ) sont rassemblées dans un même groupe **O** ( $p\text{-value} = 0,07$ ).

Au pied comme à 5m et dans les deux régions, la teneur en C du sol diminue suivant la profondeur (0-10 ; 10-20 et 20-30). Toutefois, cette diminution n'est significative que pour les horizons 0-10 à 10-20, les teneurs en C du sol des horizons 10-20 et 20-30 n'étant pas significativement différentes.

#### c) Densité apparente

Les Da des sols de Morondava ( $1,26 \pm 0,32 \text{ g.cm}^{-3} \text{ Q}$ ) et de Sakaraha ( $1,37 \pm 0,27 \text{ g.cm}^{-3} \text{ Q}$ ) ne présentent pas de différence significative ( $p\text{-value} = 0,24$ ).

A Sakaraha, la Da du sol au pied des espèces oxalogènes ( $1,19 \pm 0,31 \text{ g.cm}^{-3} \text{ I}$ ) ne diffère pas significativement de celle à 5m ( $1,32 \pm 0,16 \text{ g.cm}^{-3} \text{ I}$ ) ( $p\text{-value} = 0,11$ ). Par contre, à Morondava, une différence significative est observée entre les Da des sols au pied ( $1,26 \pm 0,38 \text{ g.cm}^{-3} \text{ +}$ ) et à 5m ( $1,47 \pm 0,25 \text{ g.cm}^{-3} \text{ +}$ ) des espèces oxalogènes ( $p\text{-value} = 0,009$ ).

Dans les deux régions, la Da du sol au pied des espèces oxalogènes augmente suivant la profondeur (0-10 ; 10-20 et 20-30). Cependant, la différence n'est significative qu'au niveau de l'horizon 0-10.

Tableau 6: Teneurs en CaCO<sub>3</sub>, en C et la densité apparente des sols

Région	Distance	Profondeur	CaCO <sub>3</sub> (g.kg <sup>-1</sup> )			C (g.kg <sup>-1</sup> )			Da (g.cm <sup>-3</sup> )		
			μ	σ	Groupe	μ	σ	Groupe	μ	σ	Groupe
Sakaraha	0 m	0-10	5,67	4,45	+	82,08	65,38	<b>A</b>	0,91	0,19	<b>B</b>
		10-20	7,36	7,65	+	37,08	27,51	<b>AB</b>	1,31	0,27	<b>A</b>
		20-30	4,16	7,4	+	19,68	8,92	<b>A</b>	1,35	0,25	<b>A</b>
	5 m	0-10	1,67	0,61	I	44,27	17,73	xx'	1,20	0,22	a'
		10-20	1,25	0,83	I	23,06	18,33	x	1,3	0,24	a'
		20-30	1,33	0,92	I	11,52	12,91	x	1,47	0,14	a'
Morondava	0 m	0-10	34,77	38,88	*	76,36	62,22	<b>a</b>	0,87	0,35	<b>b</b>
		10-20	3,97	2,98	**	16,60	5,13	<b>b</b>	1,39	0,25	<b>a</b>
		20-30	3,76	6,63	**	7,25	4,75	<b>b</b>	1,52	0,16	<b>a</b>
	5 m	0-10	3,14	2,58	-	35,47	23,19	<b>A</b>	1,33	0,23	<b>b</b>
		10-20	1,59	0,43	-	10,07	4,74	<b>B</b>	1,53	0,12	<b>a</b>
		20-30	1,63	0,68	-	4,09	2,19	<b>B</b>	1,59	0,09	<b>a</b>

Avec : μ: moyenne ; σ: écart-type

(-): Les regroupements n'ont pas pu être faits car la significativité des différences n'est pas transitive dans le cas en question

## 2.2.2. Profil des teneurs en CaCO<sub>3</sub>, en C et des Da au niveau des espèces oxalogènes

### a) Teneur en CaCO<sub>3</sub> au pied et à 5m des espèces oxalogènes

Au pied et à 5m des espèces oxalogènes, la teneur en CaCO<sub>3</sub> diminue au fur et à mesure que la profondeur augmente. Seule *Ceiba pentandra* fait exception à cette tendance générale.

Au niveau des profils au pied des arbres oxalogènes, une différence significative ( $p\text{-value}=0,02$ ) est notée entre les différentes espèces et à différentes profondeurs. La différence n'est toutefois évidente qu'au niveau de la profondeur 0-10 cm où *Tamarindus indica* ( $64,35 \pm 52,32 \text{ g.kg}^{-1} \text{ a}$ ) et *Ceiba pentandra* ( $39,42 \pm 37,01 \text{ g.kg}^{-1} \text{ a}$ ) se distinguent fortement des autres espèces. A 5m, les teneurs en CaCO<sub>3</sub> des espèces à différentes profondeurs sont pratiquement égales ( $p\text{-value}=0,26$ ) quoique la teneur en CaCO<sub>3</sub> de *Ceiba pentandra* ( $4,84 \pm 1,02 \text{ g.kg}^{-1} \text{ a}$ ) sur 0-10 cm se soit un peu démarquée des autres.



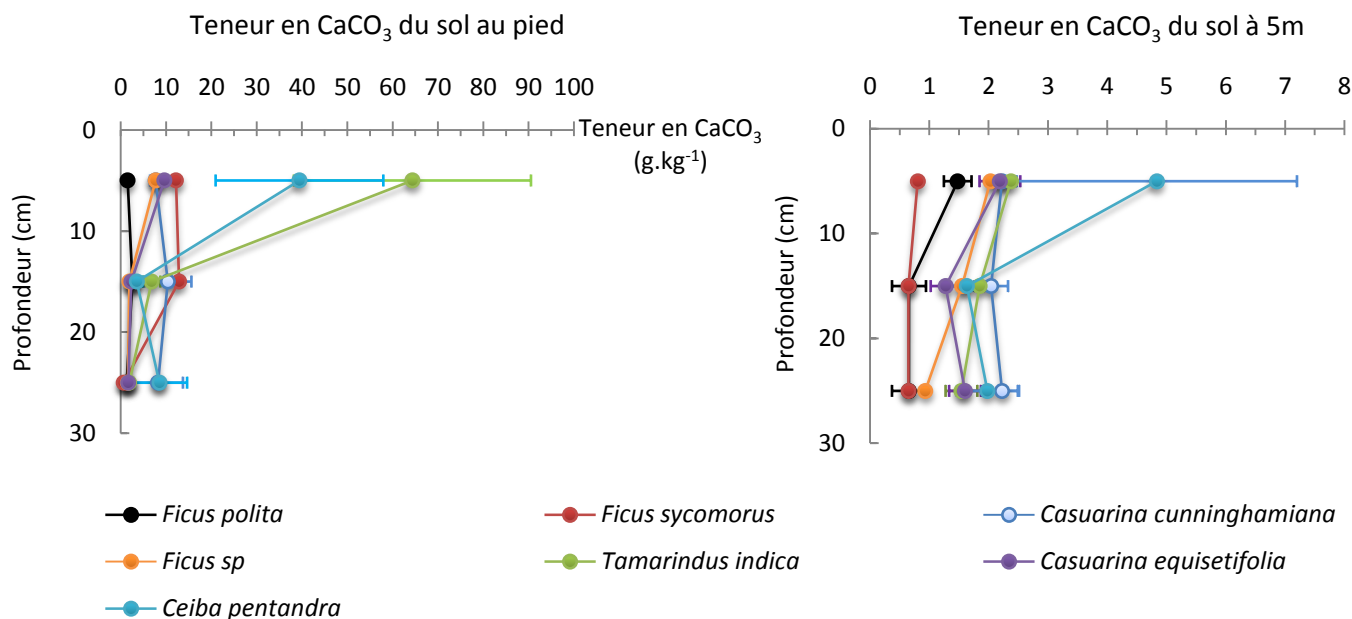


Figure 5: Teneur en  $\text{CaCO}_3$  du sol au pied et à 5 m des espèces oxalogènes

### b) Teneur en C au pied et à 5m des espèces oxalogènes

A l'exception de *Ficus sycomorus* et de *Casuarina cunninghamiana*, la teneur en C du sol au pied et à 5m des arbres oxalogènes diminue à mesure que la profondeur augmente. Une différence significative est observée entre la profondeur 0-10 et les profondeurs 10-20 et 20-30 ( $p\text{-value} = 0,009$ ). La teneur en C maximale s'obtient généralement avec la profondeur 0-10.

Entre espèces et suivant la profondeur, la teneur en C la plus élevée est associée à *Ficus polita* sur 0-10 cm ( $134,82 \pm 70,55 \text{ g.kg}^{-1} \text{ b}$ ) au pied des arbres et à *Ficus sycomorus* sur 0-10 cm ( $71,09 \text{ g.kg}^{-1} \text{ b}$ ) à 5m. La teneur la plus faible est observée chez *Casuarina equisetifolia* sur 20-30 cm du sol au pied ( $4,68 \pm 1,92 \text{ g.kg}^{-1} \text{ a}$ ) et à 5 m ( $2,33 \pm 0,57 \text{ g.kg}^{-1} \text{ a}$ ).

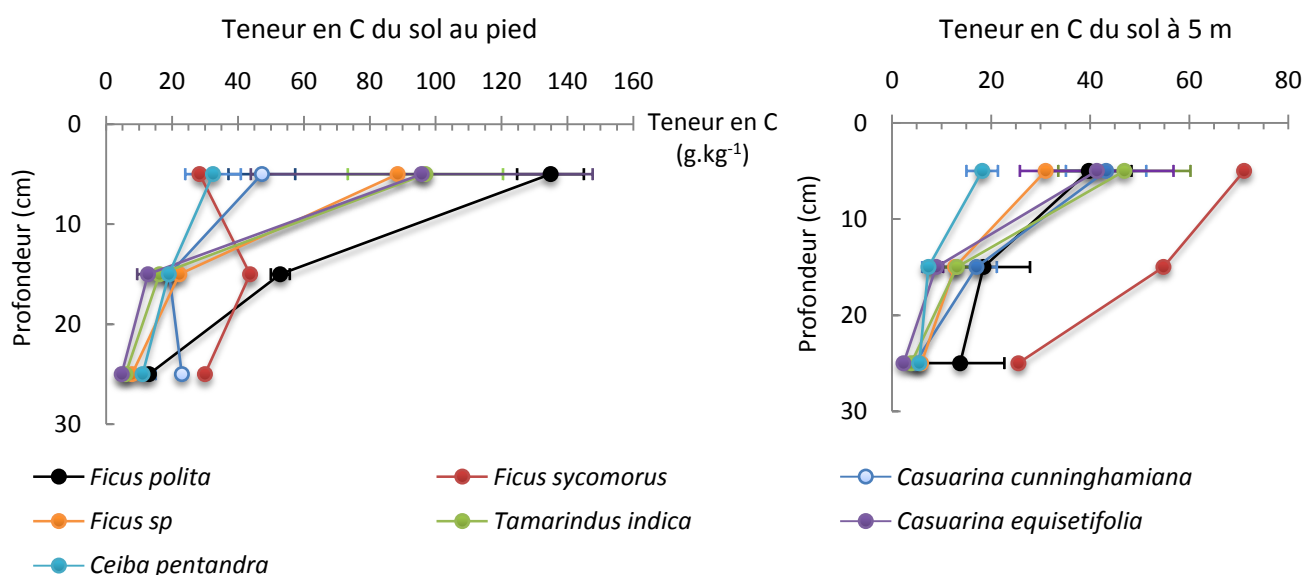


Figure 6: Teneur en C du sol au pied et à 5 m des espèces oxalogènes

### c) Da du sol au pied et à 5m des espèces oxalogènes

Contrairement aux teneurs en  $\text{CaCO}_3$  et en C, la Da du sol augmente avec la profondeur, au pied comme à 5m. Ainsi, la densité apparente la plus élevée s'observe toujours avec la profondeur 20-30. *Ficus sycomorus* et *Ceiba pentandra* font exception à cette tendance générale.

Une différence significative est notée entre les différentes espèces et les différentes profondeurs au pied ( $p\text{-value} = 0,0001$ ) et à 5m ( $p\text{-value} < 0,0001$ ). La densité maximale, égale à  $1,67 \pm 0,07 \text{ g.cm}^{-3}$ , est observée chez *Casuarina equisetifolia* avec la profondeur 20-30 et à une distance de 5m.

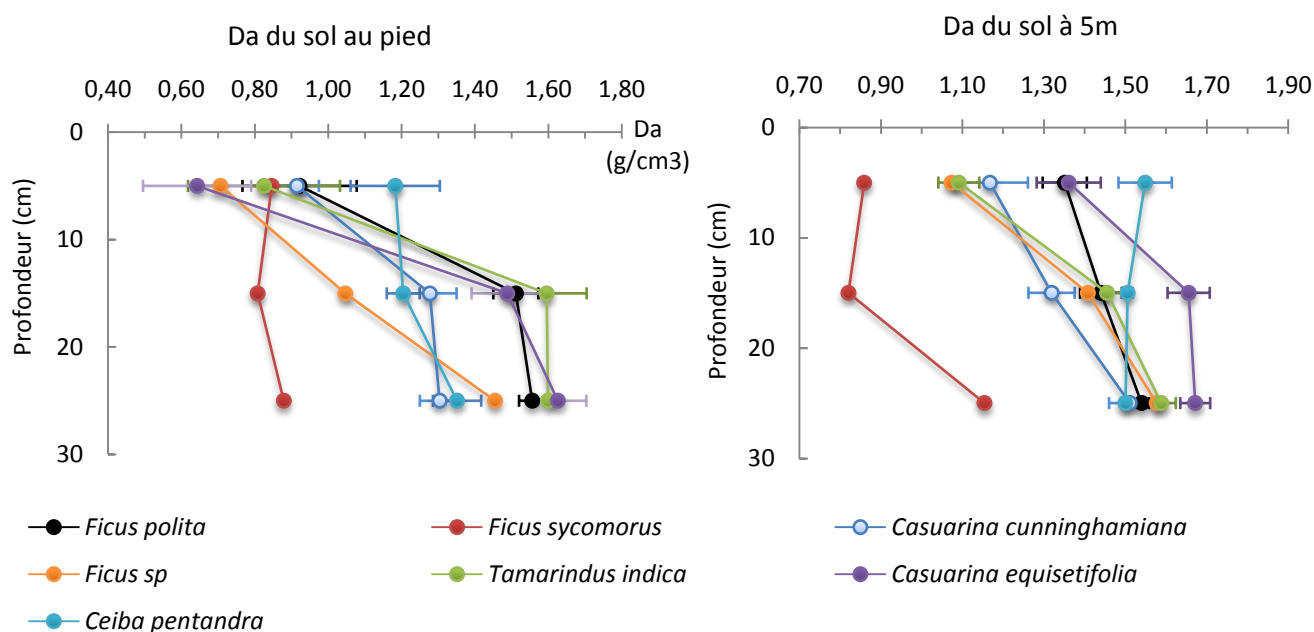


Figure 7: Profils densimétriques (Da) du sol au pied et à 5 m des espèces oxalogènes

### 2.2.3. Teneur en $\text{CaCO}_3$ des sols suivant différents facteurs

#### a) Teneur en $\text{CaCO}_3$ selon le genre

La teneur en  $\text{CaCO}_3$  la plus élevée est obtenue avec *Tamarindus* ( $24,33 \pm 39,91 \text{ g.kg}^{-1}$ ) alors que la plus faible est associée au genre *Ficus* ( $3,51 \pm 4,07 \text{ g.kg}^{-1}$ ). L'écart-type est particulièrement grand au niveau du genre *Tamarindus*. Entre les différents genres, il n'y a pas de différence significative ( $p\text{-value} = 0,06$ ) et ils sont classés dans un seul groupe vu leurs écart-types.

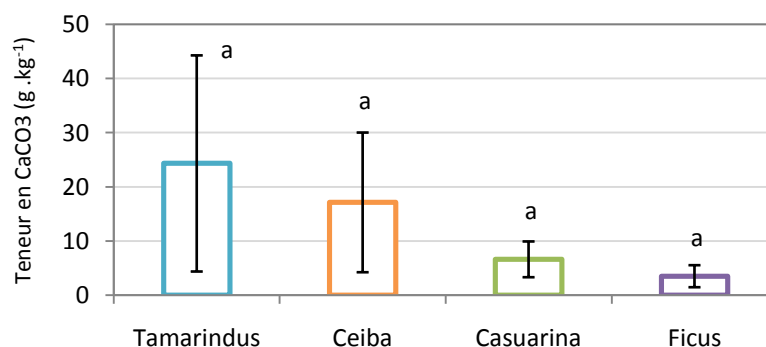


Figure 8: Teneur en  $\text{CaCO}_3$  selon le genre

### b) Teneur en $\text{CaCO}_3$ selon le genre et la région

La teneur en  $\text{CaCO}_3$  de *Casuarina* trouvée à Sakaraha ( $8,74 \pm 7,77 \text{ g.kg}^{-1}$ ) est supérieure à celle de Morondava ( $4,51 \pm 4,72 \text{ g.kg}^{-1}$ ). Concernant le genre *Ficus*, la teneur la plus élevée a été obtenue à Morondava ( $3,70 \pm 3,44 \text{ g.kg}^{-1}$ ). Cependant, ces différences ne sont pas significatives ( $p\text{-value} = 0,18$ ).

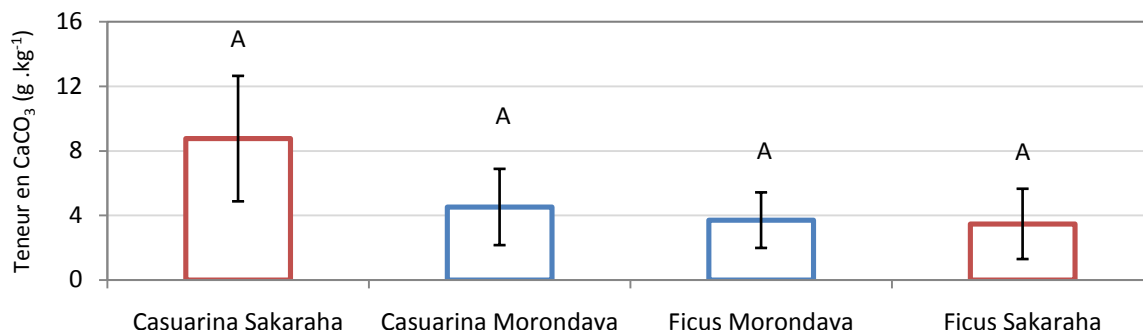


Figure 9: Teneur en  $\text{CaCO}_3$  selon le genre et la région

### c) Teneur en $\text{CaCO}_3$ selon le genre et la profondeur au pied des arbres

A l'exception du genre *Ceiba*, la teneur en  $\text{CaCO}_3$  au pied des arbres oxalogènes a tendance à diminuer au fur et à mesure que la profondeur augmente.

Entre les différents genres et à différentes profondeurs, la teneur en  $\text{CaCO}_3$  présente une différence significative ( $p\text{-value} < 0,0001$ ) notamment au niveau du genre *Tamarindus* à une profondeur de 0-10 cm ( $64,35 \pm 52,33 \text{ g.kg}^{-1}$  b).

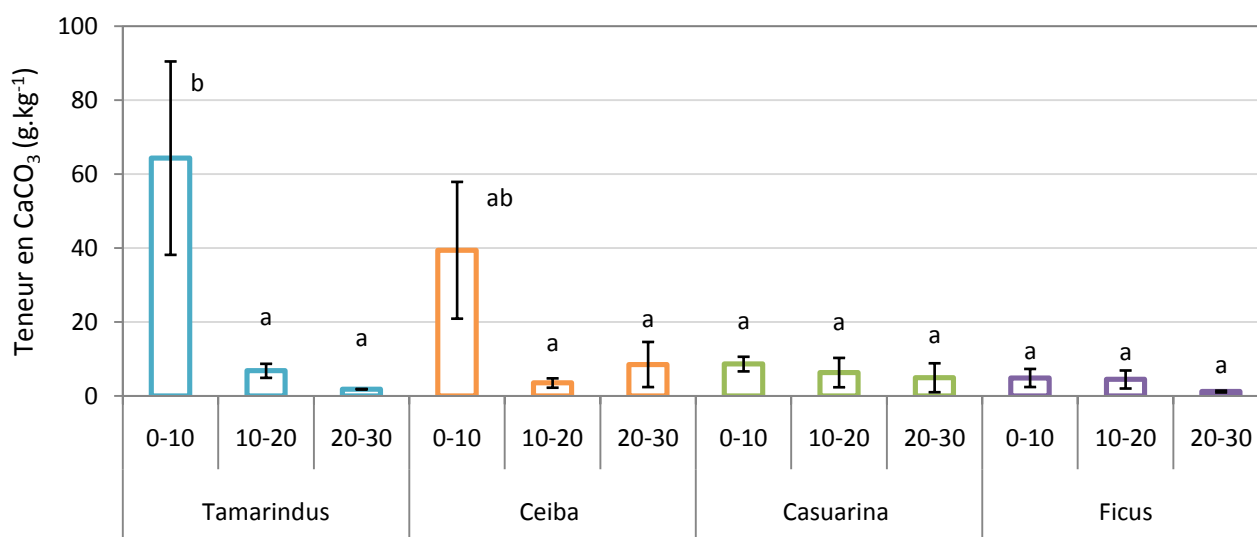


Figure 10: Teneur en  $\text{CaCO}_3$  selon le genre et la profondeur au pied des arbres

### d) Teneur en $\text{CaCO}_3$ selon l'espèce

*Tamarindus indica* est l'espèce oxalogène qui possède la teneur maximale en  $\text{CaCO}_3$  ( $24,33 \pm 39,91 \text{ g.kg}^{-1}$ ). La teneur minimale, égale à  $1,77 \pm 1,17 \text{ g.kg}^{-1}$ , est observée avec *Ficus polita*. Malgré cette distinction apparente, les teneurs en  $\text{CaCO}_3$  des différentes espèces ne présentent pas de

différence significative ( $p\text{-value} = 0,28$ ) en partie à cause d'une forte variation intraspécifique qui est d'ailleurs très marquée chez *Tamarindus indica* (entouré de petits traits dans la Figure 11).

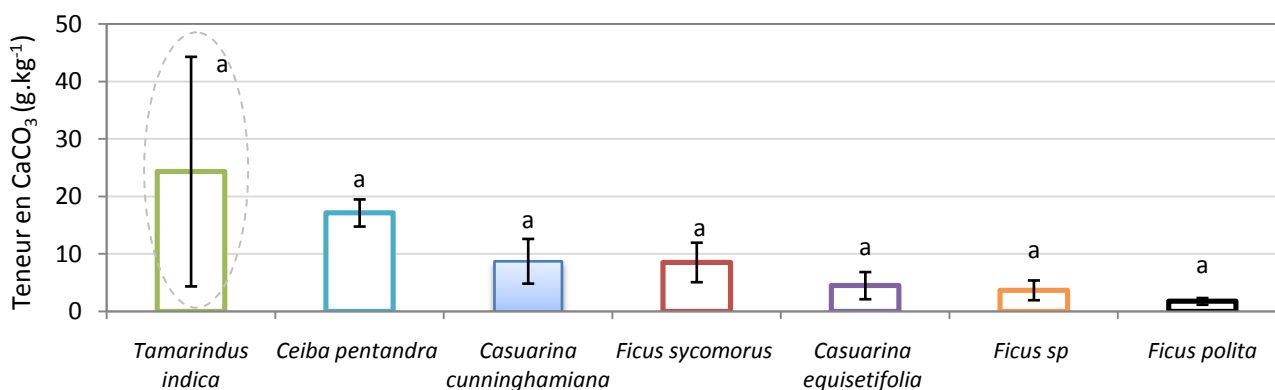


Figure 11: Teneur en CaCO<sub>3</sub> selon l'espèce

#### 2.2.4. Stocks de C et de CaCO<sub>3</sub>

##### a) Stock de C au pied

Les stocks de carbone des deux régions sont significativement différents ( $p\text{-value}=0,03$ ). Les sols de Sakaraha ont un stock de C ( $143,67 \pm 75,68 \text{ Mg.ha}^{-1}$  a) largement supérieur à celui de Morondava ( $83,56 \pm 25,52 \text{ Mg.ha}^{-1}$  b).

Par contre, aucune différence significative ( $p\text{-value} = 0,07$ ) n'est observée entre les stocks de carbone des différents genres en dépit d'un écart non négligeable entre les stocks maximal (celui du genre *Ficus* :  $163,17 \pm 82,67 \text{ Mg.ha}^{-1}$  a) et minimal (celui du genre *Ceiba* :  $73,25 \pm 30,13 \text{ Mg.ha}^{-1}$  a).

Concernant les différentes espèces, une différence significative est observée entre leurs stocks de C ( $p\text{-value}=0,01$ ). *Ficus polita* possède le stock le plus élevé ( $211,54 \pm 70,98 \text{ Mg.ha}^{-1}$  a) tandis que le plus faible est obtenu avec *Casuarina equisetifolia* ( $71,04 \pm 30,76 \text{ Mg.ha}^{-1}$  b).

Tableau 7 : Stock de C du sol au pied des espèces oxalogènes

Régions	Genres	Espèces	Stock C (Mg.ha <sup>-1</sup> )		
			μ	σ	Groupe
Sakaraha	Casuarina	<i>C. cunninghamiana</i>	95,67	13,74	AB
	Ficus	<i>Ficus polita</i>	211,05	70,98	A
		<i>F. sycomorus</i>	85,58	-	AB
Morondava	Casuarina	<i>C. equisetifolia</i>	71,04	30,76	B
	Ceiba	<i>Ceiba pentadra</i>	73,25	30,13	B
	Ficus	<i>Ficus sp</i>	97,13	-	AB
	Tamarindus	<i>T. indica</i>	101,88	9,32	AB

μ: moyenne ; σ: écart-type

### b) Stock de $\text{CaCO}_3$ au pied selon la région

Le stock de  $\text{CaCO}_3$  du sol au niveau des espèces oxalogènes de Morondava ( $38,78 \pm 32,58 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ a}$ ) est largement supérieur à celui de Sakaraha ( $19,19 \pm 20,36 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ a}$ ). Cependant, les stocks de  $\text{CaCO}_3$  des deux régions ne présentent pas de différence significative ( $p\text{-value} = 0,18$ ).

### c) Stock de $\text{CaCO}_3$ selon le genre

Les stocks de  $\text{CaCO}_3$  des différents genres étudiés ne sont pas significativement différents ( $p\text{-value} = 0,07$ ). Le stock de  $\text{CaCO}_3$  le plus élevé appartient au genre *Ceiba* ( $58,54 \pm 25,36 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ a}$ ) et le plus faible au genre *Ficus* ( $10,46 \pm 6,61 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ a}$ ). Néanmoins, l'écart-type est plus important au niveau du genre *Tamarindus* (Figure 12). Aussi, en tenant compte de chaque spécimen étudié, le stock de  $\text{CaCO}_3$  le plus élevé est en réalité observé chez un spécimen appartenant au genre *Tamarindus*.

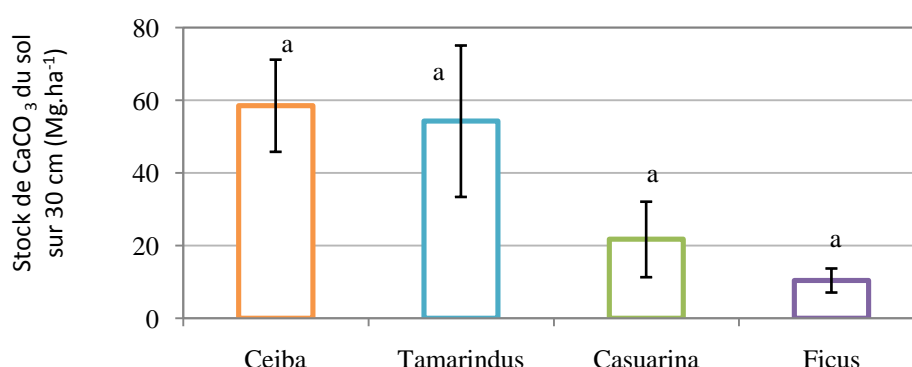


Figure 12: Stock de  $\text{CaCO}_3$  selon le genre

### d) Stock de $\text{CaCO}_3$ selon le genre et la région

Il n'y a pas de différence significative entre les stocks en  $\text{CaCO}_3$  des genres communs aux deux régions ( $p\text{-value} = 0,44$ ). Le stock de  $\text{CaCO}_3$  du genre *Casuarina* à Sakaraha ( $30,55 \pm 28,61 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ a}$ ) est supérieur à celui du même genre à Morondava ( $12,97 \pm 5,37 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ a}$ ). En ce qui concerne le genre *Ficus*, le stock le plus élevé a été obtenu à Sakaraha ( $10,67 \pm 7,61 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ a}$ ).

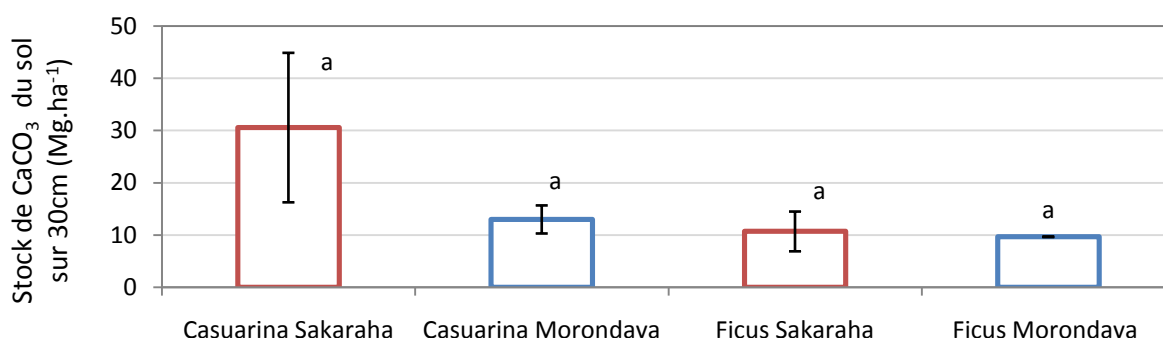


Figure 13: Stock de  $\text{CaCO}_3$  selon le genre et la région

### e) Stock de $\text{CaCO}_3$ selon l'espèce

Il n'y a pas de différence significative entre les stocks de  $\text{CaCO}_3$  des différentes espèces vu qu'elles sont classées en un seul groupe a ( $p\text{-value} = 0,18$ ). Le stock de  $\text{CaCO}_3$  le plus élevé appartient

à *Ceiba pentandra* ( $58,54 \pm 25,36 \text{ Mg.ha}^{-1} \text{ a}$ ) et le plus faible à *Ficus polita* ( $7,15 \pm 3,57 \text{ Mg.ha}^{-1} \text{ a}$ ). L'écart-type est toujours plus important au niveau de *Tamarindus indica* (Figure 14), ce qui implique que le stock de  $\text{CaCO}_3$  le plus élevé est en réalité observé chez un individu de cette espèce.

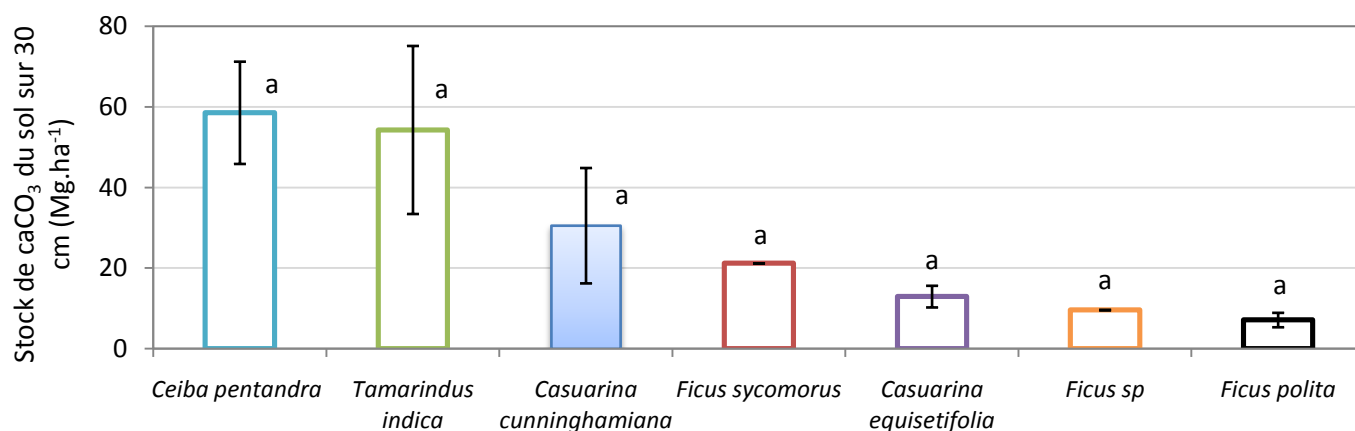


Figure 14: Stock de  $\text{CaCO}_3$  selon l'espèce

### 2.2.5. Corrélation entre les différentes variables étudiées

La corrélation entre teneur en  $\text{CaCO}_3$  ( $p\text{-value} = 0,28$ ) et teneur en C est faible. Aussi, la variation de la teneur en C n'influe pas de manière significative sur la teneur en  $\text{CaCO}_3$  du sol. Le troisième pied de *Ficus polita* [entouré de petits traits dans la Figure 15 (a)] n'est pas concerné par cette corrélation. En effet, pour cet individu, la teneur en C du sol est très élevée alors que la teneur en  $\text{CaCO}_3$  est faible.

Entre teneur en  $\text{CaCO}_3$  et hauteur des arbres, la corrélation est faible. La teneur en  $\text{CaCO}_3$  augmente faiblement avec la hauteur. *Tamarindus indica* 2, *Ficus polita* 2 et *Ceiba pentandra* 3 [entourés de petits traits dans la Figure 15 (b)] se démarquent de cette tendance car avec leurs grandes hauteurs, ils donnent des teneurs en  $\text{CaCO}_3$  particulièrement élevées.

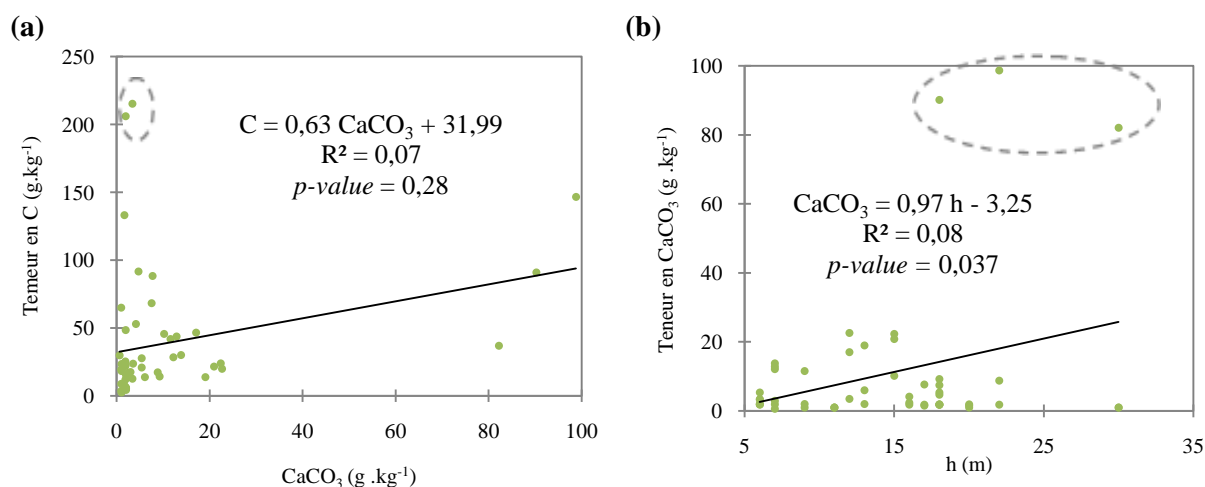


Figure 15: Corrélation entre teneur en C et teneur en  $\text{CaCO}_3$  (a) ; entre teneur en  $\text{CaCO}_3$  et hauteur(b)

La corrélation entre hauteur des arbres et stock de  $\text{CaCO}_3$  ( $p\text{-value} = 0,03$ ) est moyennement faible ( $p\text{-value} = 0,004$ ) [Figure 16 (a)]. L'augmentation du stock de  $\text{CaCO}_3$  est liée à l'accroissement

de la hauteur des arbres. Parmi les spécimens oxalogènes étudiés, *Ceiba pentandra* 3 se distingue des autres avec son stock de  $\text{CaCO}_3$  très élevé et sa grande hauteur [entouré de petits traits dans la Figure 16 (a)].

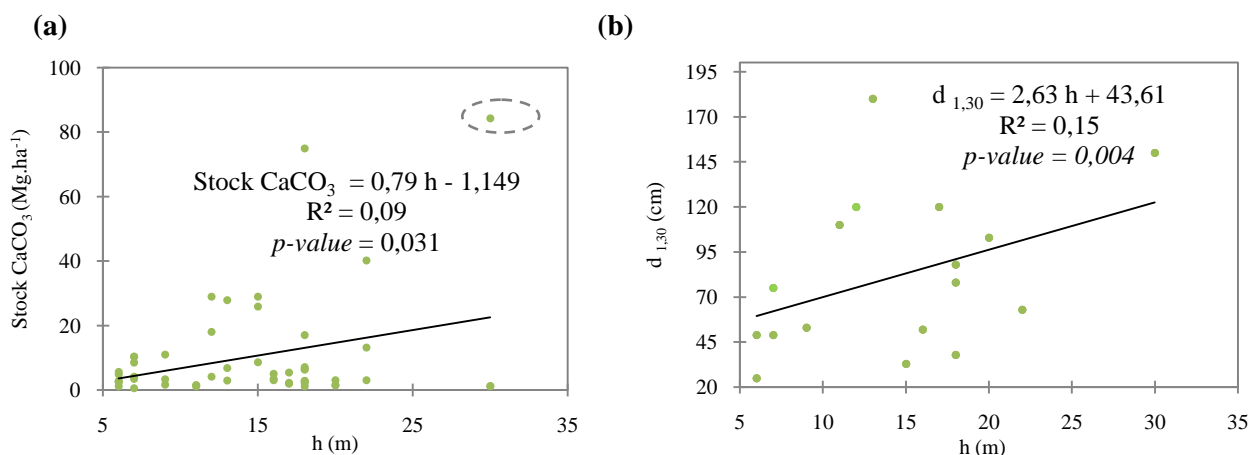


Figure 16: Corrélation entre stock de  $\text{CaCO}_3$  et hauteur(a) ; entre d et h (b)

Les corrélations entre diamètre des arbres et teneur en  $\text{CaCO}_3$  ainsi qu'entre diamètre et stock de  $\text{CaCO}_3$  sont faibles. Il semblerait donc que le diamètre des arbres n'influe pas réellement sur leur potentiel oxalogène. Néanmoins,  $d_{1,30}$  et h présentent une corrélation moyennement faible [Figure 16 (b)] et la hauteur agit sur le potentiel.

Tableau 8: Matrice de corrélation entre les variables étudiées

Variabes	C (g.kg <sup>-1</sup> )	Stock C (Mg.ha <sup>-1</sup> )	CaCO <sub>3</sub> (g.kg <sup>-1</sup> )	Stock CaCO <sub>3</sub> (Mg.ha <sup>-1</sup> )	d <sub>1,30</sub> (cm)	h (m)
C (g.kg <sup>-1</sup> )	1					
Stock C (Mg.ha <sup>-1</sup> )	0,82	1				
CaCO <sub>3</sub> (g.kg <sup>-1</sup> )	<b>0,28</b>	0,16	1			
Stock CaCO <sub>3</sub> (Mg.ha <sup>-1</sup> )	0,12	0,11	0,91	1		
d <sub>1,30</sub> (cm)	-0,05	0,01	0,06	0,13	1	
h (m)	0,07	0,16	<b>0,29</b>	<b>0,30</b>	<b>0,39</b>	1



## 2.3. Compartiment biomasse

### 2.3.1. Teneur en $\text{CaCO}_3$

La teneur en  $\text{CaCO}_3$  ( $67,93 \pm 24,30 \text{ g.kg}^{-1}$  A) des espèces oxalogènes de Sakaraha et celle de Morondava ( $60,39 \pm 23,88 \text{ g.kg}^{-1}$  A) ne présentent pas de différence significative bien que la teneur à Sakaraha soit légèrement supérieure. Il en est de même entre les différentes espèces étudiées ( $p\text{-value}=0,22$ ) à Sakaraha comme à Morondava. Parmi elles, *Ficus polita* est celle qui a la teneur en  $\text{CaCO}_3$  maximale ( $121,30 \pm 11,29 \text{ a g.kg}^{-1}$ ). La teneur minimale, égale à  $22,52 \pm 0,96 \text{ a g.kg}^{-1}$ , est obtenue avec *Casuarina equisetifolia*.

### 2.3.2. Teneur en C

La teneur en C maximale s'observe avec *Ficus sycomorus* ( $340,94 \pm 0,001 \text{ g.kg}^{-1} \text{ a'}$ ) et la minimale est associée à *Casuarina cunninghamiana* ( $122,47 \pm 0,01 \text{ g.kg}^{-1} \text{ a'}$ ). Néanmoins, aucune différence significative n'a été observée en termes de teneur en C, que ce soit entre les 2 régions ou entre les différentes espèces ( $p\text{-value} = 0,2$ ).

Tableau 9: Teneurs en  $\text{CaCO}_3$  et en C de la biomasse des espèces oxalogènes

Région	Espèces	Teneur en $\text{CaCO}_3$ ( $\text{g.kg}^{-1}$ )			Teneur en C ( $\text{g.kg}^{-1}$ )		
		$\mu$	$\sigma$	Groupe	$\mu$	$\sigma$	Groupe
Sakaraha	<i>Casuarina cunninghamiana</i>	27,61	1,49	a	122,47	0,01	a'
	<i>Ficus polita</i>	121,3	11,9	a	300,22	17,59	a'
	<i>Ficus sycomorus</i>	63,66	2,94	a	340,94	0,001	a'
Morondava	<i>Casuarina equisetifolia</i>	22,52	0,96	a	280,73	0,002	a'
	<i>Ceiba pentandra</i>	89,73	37,31	a	238,12	32,95	a'
	<i>Tamarindus indica</i>	63,35	19,27	a	280,27	18,32	a'

$\mu$ : moyenne ;  $\sigma$ : écart-type

## **PARTIE 4 : DISCUSSIONS**

---

## PARTIE 4 : DISCUSSIONS

### 1. Discussion sur la méthodologie

#### 1.1. Atouts

##### ➤ Phase préparatoire

L'étude cartographique basée sur la carte pédologique de ROEDERER et BOURGEAT (1972), qui accorde une attention particulière sur la répartition des sols calcimorphes à Madagascar, a permis de limiter les risques que les milieux d'étude ne tombent sur des sols calcaires.

##### ➤ Phase de terrain

Les entretiens avec l'Administration forestière locale, l'entité gestionnaire du massif forestier ciblé (MNP et CNFEREF) et les villageois ont permis de localiser précisément les spécimens des espèces recherchées.

Le choix des techniciens de terrain, notamment ceux qui font office de guide et d'aides pour la réalisation des travaux d'inventaire, parmi les agents de l'entité gestionnaire du massif forestier et parmi les villageois a été bénéfique pour le bon déroulement de la recherche. Leurs longues expériences, tant sur l'identification des espèces que sur leurs localisations respectives au sein du massif forestier ou des villages alentours, ont été d'une importance capitale pour la réalisation de l'étude. Leurs interventions ont été aussi nécessaires pour nous introduire auprès des villageois et réduire leurs méfiances à notre égard ainsi qu'à l'étude pédologique menée à proximité de leur habitation.

Par ailleurs, la conduite d'une visite de reconnaissance sur le terrain a eu l'avantage d'enrichir la liste des espèces potentielles sans que celles-ci n'aient fait nécessairement l'objet de prélèvement de sol. Bien que cette démarche emploie un temps considérable, elle a permis de repérer les arbres oxalogènes, de déterminer les espèces et de retenir les spécimens les plus intéressants. Par conséquent, elle a permis de maximiser le nombre d'espèces réellement oxalogènes explorées dans le milieu d'étude en tenant compte du temps disponible pour les travaux de terrain.

##### ➤ Analyses au laboratoire

La limitation des analyses aux individus ayant présenté de l'effervescence sur l'arbre et sur le sol a permis de focaliser l'étude sur les spécimens les plus prometteurs tout en réduisant le coût alloué à celle-ci.

#### 1.2. Contraintes et limites

##### ➤ Contraintes

Une contrainte majeure rencontrée dans la réalisation de cette étude est l'insuffisance de moyens matériels, financiers et du temps disponible pour les travaux de terrain.

Effectivement, au cours de la phase de prélèvement des échantillons, des espèces potentielles pourtant présentes dans des localités frontalières des milieux d'étude n'ont pas pu être prises en compte par manque de temps. De même, le nombre de pieds d'arbres oxalogènes pour chaque espèce

potentielle devait être supérieur ou égal à trois (3). Pourtant, en raison du fort éloignement entre certains pieds adultes d'une même espèce, ceci n'a pu être respecté que pour quelques espèces présentant des traces visibles de calcaire dans le sol ou le bois. Par ailleurs, ce manque de temps a été aggravé par le manque de moyen de déplacement rapide. Parcourir des kilomètres, pourtant accessibles par voie routière, constitue en effet une perte de temps considérable qui aurait pu servir à l'identification d'autres espèces oxalogènes dans le milieu d'étude.

L'insuffisance de moyens matériels adéquats et facilement manipulables sur terrain a constitué une autre contrainte d'envergure. Ceci concerne particulièrement les papiers-pH. Ils ne permettent pas toujours de donner une valeur fiable du pH. Dans certains cas, notamment lorsque la solution du mélange eau distillée - sol est particulièrement boueux, le virage de couleur devient difficile voire impossible à déterminer. Il arrive aussi que la couleur obtenue après virage ne corresponde à aucune des couleurs relatives au papier-pH utilisé. Ceci explique la non détermination du pH de certains échantillons.

Enfin, le nombre d'échantillons de sol à analyser a été limité par le coût élevé des analyses chimiques au laboratoire. Ceux qui n'ont pas présenté de l'effervescence au test à l'HCl n'ont pas été considérés même si les arbres ont présenté des traces de calcaire. Pour cette raison, certaines espèces oxalogènes n'ont été étudiées qu'à travers les analyses portant sur les échantillons d'un seul pied d'arbre alors que les prélèvements ont été effectués sur trois (3) pieds.

#### ➤ Limites

La crédibilité des résultats de l'inventaire forestier réalisée en vue de l'étude phytosociologique peut être remise en cause par l'exiguïté de la surface inventoriée. Celle-ci est fonction du nombre de placettes mises en place et donc du nombre d'arbres oxalogènes explorés qui était pourtant limité à défaut du facteur temps.

Les profils d'observation ayant été creusés sur une profondeur de 60 cm, les toposéquences ont été limités à cette profondeur. Aussi, la véritable nature des différents types de sol est susceptible d'être remise en cause.

La façon dont le prélèvement de la biomasse a été effectué ne permet pas de faire une comparaison objective des teneurs en  $\text{CaCO}_3$  chez les différentes espèces oxalogènes. De plus, les échantillons considérés ne sont pas du même type (bois mort, écorce, litière). L'existence de biais dans les résultats obtenus à partir de ces échantillons de biomasse n'est donc pas à écarter.

L'absence d'information sur l'âge exacte des arbres oxalogènes notamment dans les forêts naturelles, ne permet pas de faire une comparaison objective entre la potentialité des espèces oxalogènes malgaches et celles des autres pays tropicaux. Cette comparaison a quand même été faite pour pouvoir situer le niveau de la potentialité des espèces oxalogènes malgaches. Les résultats qui en découlent peuvent donc être remis en question.

Mais la limite de cette étude réside essentiellement au niveau de la fiabilité de la conclusion tirée de l'analyse des échantillons dont les conditions de répétition n'ont pas toujours été respectées.

## 2. Discussion sur les résultats et les hypothèses

### 2.1. Discussions sur les résultats

#### a) Espèces oxalogènes rencontrées dans la zone d'étude

##### *Ficus spp*

Les *Ficus* rencontrées dans la zone d'étude ont toutes présenté des traces de calcaire. Ceci s'explique par la présence de cystolithes dans les feuilles des espèces de ce genre (PERRIER et *al.*, 1997 ; PANCRACIO et LAFLAQUIÈRE, 2002 ; DE BOECK et LARCIER, 2006). Un certain niveau est cependant décelable entre les différentes espèces suivant les degrés d'effervescence observée.

*Ficus marmorata* semble être celle qui a le plus faible potentiel parmi les 4 espèces de *Ficus* étudiées. Effectivement, aucune des 3 spécimens de cette espèce n'a présentée de l'effervescence au sol et l'effervescence sur l'arbre est réduite en certains points des parties dégradées du bois. Par ailleurs, le pH du sol au pied et celui à 5m de l'arbre ne sont pratiquement pas différents (5,5 - 5).

*Ficus sp* (Fihamy) a apparemment un potentiel voisin de *Ficus marmorata*. Néanmoins, un spécimen a donné de l'effervescence au niveau du sol.

*Ficus polita* et *Ficus sycomorus* ont un potentiel beaucoup plus élevé. Les individus de ces espèces ont tendance à présenter des traces de calcaire jusqu'au sol avec une distinction du pH au pied et à 5m. L'effervescence chez *Ficus sycomorus* est cependant plus persistante, notamment sur les taches jaunâtres du sol. D'ailleurs, un pH eau égal à 7 a été atteint au pied d'un spécimen de cette espèce pour la profondeur 10-20 cm alors qu'à 5m et pour la même profondeur, celle-ci n'est que de 5,5.

Cette variation apparente du potentiel oxalogène chez ces espèces du même genre relève probablement de la biologie et de la physiologie propres à chaque espèce. *Ficus polita* se démarque entre autres par son port fortement branchu et son feuillage dense et caduc (RASPLUS, 2002). La surface photosynthétique est donc beaucoup plus importante que pour les autres espèces. Par conséquent, l'activité photosynthétique, et de ce fait, la biosynthèse de l'oxalate sont tout aussi importantes pendant la période où l'arbre garde ses feuilles. *Ficus sycomorus*, sans avoir un feuillage particulièrement dense comme *Ficus polita*, a l'avantage d'être semi-décidu (ICRAF, 2002). L'activité photosynthétique s'étend donc sur une plus longue période pendant l'année.

##### *Casuarina spp*

L'effervescence rencontrée chez *Casuarina cunninghamiana* et *Casuarina equisetifolia* est particulièrement nette et persistante au niveau de l'arbre, de la litière et des taches blanchâtres observées dans la rhizosphère. Le pH eau du sol au pied des spécimens étudiés atteint en surface une valeur égale à 7 alors qu'à 5m, le pH est de 6 voire 5,5. *Casuarina cunninghamiana* et *Casuarina equisetifolia* sont donc des espèces oxalogènes.

*Casuarina cunninghamiana* se distingue cependant par la production de petit caillou calcaire. Mise à part les spécificités biologiques et physiologiques des espèces, les caractéristiques

pédologiques de la station où elles se trouvent jouent probablement un rôle non négligeable dans cette divergence. Toutefois, la différence d'âge entre les spécimens étudiés en est sans doute la principale cause. Les individus de l'espèce *Casuarina cunninghamiana* ont visiblement atteint le stade de sénescence (près de 60 ans) et ils étaient disposés côte à côte sur un sol de type ferrugineux lessivé. Aussi, ils ont largement eu le temps de produire et de stocker le calcaire dans le sol et les caractéristiques de celui-ci le permettaient. Les individus de l'espèce *Casuarina equisetifolia* sont nettement plus jeunes. Ils poussent sur un sol hydromorphe. L'anaérobiose, fréquemment observée au niveau de ce type de sol, n'est pas favorable aux stréptomycètes oxalotrophes qui sont des bactéries aérobies contribuant à la précipitation de carbonate de calcium (BRAISSANT, 2005).

#### ***Tamarindus indica***

*Tamarindus indica* (FABACEAE S-f CESALPINIOÏDEAE) est une espèce oxalogène car les spécimens étudiés ont donné de l'effervescence nette et persistante au niveau de l'écorce de l'arbre, de la litière et des premiers horizons du sol. Le pH eau du sol au pied et celui à 5 m sont par ailleurs significativement différents. Ils vont de 7,5 à 6, voire 5,5.

Sa grande cime étalée et son feuillage persistant sont probablement à l'origine du fort potentiel oxalogène chez cette espèce. Concernant les spécimens étudiés, le sol de type ferrugineux lessivé à texture sablo-argileuse est favorable à l'occurrence de la voie oxalate-carbonate.

#### ***Ceiba pentandra***

Les spécimens de *Ceiba pentandra* (BOMBACACEAE) ont donné de l'effervescence nette au niveau du bois dégradé de l'arbre et du sol. Le pH du sol au pied de l'arbre atteint en outre une valeur égale à 8, en surface, alors qu'elle est de 5,5 à 5m. *Ceiba pentandra* est donc une espèce oxalogène.

#### ***Cordia myxa***

*Cordia myxa* (BORAGINACEAE) n'a donné de l'effervescence que sur l'écorce de l'arbuste. L'effervescence observée n'est pas persistante. Le pH du sol au pied et celui à 5 m des spécimens étudiés ne varient que très peu (6 à 5,5). *Cordia myxa* est une espèce oxalogène quoique son potentiel soit apparemment plus faible.

#### ***Broussonetia greveana***

Dans la forêt de Kirindy à Morondava, un chablis de cette espèce, a présenté des traces de calcaire au niveau du tronc et des racines alors que les spécimens étudiés à Sakaraha n'ont pas présenté la moindre trace. Le chablis, étant en cours de décomposition, l'effervescence sur le tronc et les racines témoignent de la présence d'oxalate de calcium dans le bois de cette espèce. Les spécimens étudiés à Sakaraha et celui à Morondava ont à peu près les mêmes dimensions ( $d_{1,30}$  et h), la seule différence tangible entre eux, à part le fait que le spécimen de Sakaraha soit un chablis et non un arbre sur pied comme les deux autres, est le type de sol et notamment la texture de celui-ci. Les spécimens de Sakaraha (dans la forêt de Zombitse) étaient sur un sol à texture sableuse. Ce sol, qualifié de sables blancs podzoliques (RAUNET, 1997), semble être défavorable à l'induction de la voie oxalate-carbonate par sa nature trop « filtrante » qui ne permet pas de retenir l'oxalate et le calcium.

Remarques :

- Les traces de calcaire sur les arbres ayant présenté le potentiel d'oxalate de calcium sont généralement rencontrées au niveau des parties dégradées du bois sur pied. Ces dégâts sur l'arbre étaient pour la plupart causés par des processus naturels comme des attaques de termites qui auraient permis de favoriser le phénomène de la voie oxalate-carbonate (JACCOTTET, 2010).

- Les espèces oxalogènes trouvées dans la zone d'étude correspondent en général à des espèces rustiques et capables de s'adapter à des terrains difficiles.

**b) Espèces ne présentant pas le potentiel d'oxalate de calcium**

Dans le contexte de la zone d'étude, *Cedrelopsis grevei* (RUTACEAE), une espèce présumée oxalogène à cause de l'existence de cristaux d'oxalate de calcium dans le bois (RAZAFIMAMONJISON, 2007) n'a pas présenté le potentiel oxalogène. En effet, il a été exploré à Sakaraha comme à Morondava avec deux pieds adultes dans chaque région sans que la moindre effervescence n'ait été observée.

*Acacia mangium* (FABACEAE S.f. MIMOSOÏDEAE) figure dans la liste des espèces oxalogènes (Com. Pers., VERECCHIA et *al.*, 2012). Pourtant, le spécimen étudié à Sakaraha n'a pas donné la moindre trace de calcaire. Le pH eau du sol au pied de l'arbre est en outre identique à celui du sol à 5m qui est de 5,5. Or, la biominéralisation du calcaire est censée produire un effet alcalinisant sur le sol (GOBAT et *al.*, 2010). Il y a donc assez d'évidence pour dire que le potentiel oxalogène est absent chez le spécimen étudié.

Deux facteurs peuvent être à l'origine de ceci. Le premier relève de l'âge de l'arbre, le second est en relation avec la nature de la station où il se trouve. Le spécimen n'a effectivement que sept (7) ans en dépit de sa taille (13 m x 45 cm). Il se pourrait que l'absence d'effervescence visible au niveau de l'arbre soit due à son jeune âge, les arbres concernés par la recherche de la voie oxalate-carbonate étant surtout des individus adultes (ARAGNO et *al.*, 2010). Quant à l'inexistence de trace de calcaire dans le sol, il peut résulter en partie de l'absence d'accumulation de litière au pied de l'arbre alors que celle-ci est le principal compartiment qui alimente le sol en oxalate de calcium (BRAISSANT, 2005). L'absence de litière est due soit à un enlèvement des débris de feuilles mortes sous l'arbre soit ceux-ci sont emportés par le vent. Le spécimen étudié se trouve en fait dans un jardin de case d'un village près de Zombitse sur les abords de la RN7.

Remarque :

Le fait qu'une espèce n'ait pas présenté le potentiel oxalogène dans la zone d'étude ne permet pas de dire que ce n'est pas une espèce oxalogène. Les cas de *Broussonetia greveana* et d'*Acacia mangium* qui n'ont pas présenté le potentiel oxalogène à Sakaraha alors que des spécimens de ces espèces ont donné de l'effervescence ailleurs le prouvent.



### c) Relation entre les propriétés des types de sol rencontrés et le potentiel oxalogène

La formation de  $\text{CaCO}_3$  se produit dans un sol à pH acide comme le cas des sols ferrugineux lessivés. Ce type de sol est dominant au niveau des arbres oxalogènes des 2 régions et notamment sous *Tamarindus indica* et *Ceiba pentandra* dont les teneurs et les stocks de  $\text{CaCO}_3$  sont largement supérieurs à ceux des autres espèces.

Le potentiel oxalogène varie aussi suivant la profondeur du sol car la teneur en  $\text{CaCO}_3$  diminue avec la profondeur. Ceci a été également observé à Mankaré (Cameroun) où une diminution de la concentration d'oxalate a été observée dans le sol sous *Milicia excelsa* (Iroko). La teneur en  $\text{CaCO}_3$  est passée de  $70 \text{ mg.kg}^{-1}$  dans les couches supérieures à  $0 \text{ mg.kg}^{-1}$  en profondeur (BRAISSANT, 2005). En fait, les activités biologiques, responsables de la précipitation d'oxalate de calcium dans le sol, diminuent au fur et à mesure que la profondeur du sol augmente. Etant donné que la profondeur 0-10 cm se trouve dans un horizon riche en matière organique et favorable aux activités biologiques du sol, sa teneur en  $\text{CaCO}_3$  est donc très élevée par rapport aux autres profondeurs.

Par ailleurs, dans la profondeur 0-10 cm, à plus forte teneur en  $\text{CaCO}_3$ , la texture du sol est plus sableuse quelque soit le type de sol. Il semblerait donc que ce soit cette texture plus sableuse qu'argileuse qui soit plus favorable à la biominéralisation du calcaire. Cela rejoint ce que HALITIM (1988 In MADANI, 2008) a dit : «la teneur en argile est inversement proportionnelle au pourcentage de calcaire». En d'autres termes, plus le sol est argileux, moins il y a de calcaire.

La différence en termes de teneurs en  $\text{CaCO}_3$  entre les espèces était donc évidente dès que le facteur profondeur ait été pris en compte.

### d) Relation entre régions d'étude et le potentiel oxalogène

Le facteur région n'agit pas sur le potentiel oxalogène étant donné que les stocks de  $\text{CaCO}_3$  des régions d'études ne présentent pas de différence significative. Il faudrait néanmoins considérer ce résultat avec précaution dans la mesure où les deux régions possèdent à peu près les mêmes conditions pédoclimatiques.

Néanmoins, au sein d'une même région, une forte variabilité est constatée. Cette variabilité intra-régionale était beaucoup plus marquée à Morondava, en partie à cause de la considération de différentes espèces ayant leur propre potentiel oxalogène, mais aussi en raison des différences en termes de conditions pédoclimatiques au niveau des points de prélèvement.

### e) Relation entre taxon, dimensions des arbres et potentiel oxalogène

L'appartenance taxonomique des arbres oxalogènes étudiés a des effets sur le potentiel oxalogène puisqu'en termes de teneur en  $\text{CaCO}_3$ , les genres et les espèces révèlent des différences significatives du moment que la profondeur est prise en compte. En outre, il existe une corrélation positive entre la hauteur et la teneur en  $\text{CaCO}_3$ . Comme la hauteur d'un arbre varie d'un individu à un autre d'une part et selon les espèces et les genres d'autre part, le potentiel oxalogène sera donc différent entre les genres, entre les espèces ou même entre les individus d'une même espèce.

Dans cette étude, les teneurs et les stocks en  $\text{CaCO}_3$  de *Tamarindus indica* 1 ( $90,20 \text{ g.kg}^{-1}$  ;  $94,85 \text{ Mg. ha}^{-1}$ ) et de *Ceiba pentandra* 3 ( $82,14 \text{ g.kg}^{-1}$  ;  $86,16 \text{ Mg. ha}^{-1}$ ) se sont toujours démarquées de ceux des autres individus étudiés par leur valeur élevée. Toutefois, les teneurs et les stocks en  $\text{CaCO}_3$  de ces espèces restent faibles comparés à ceux trouvés dans d'autre pays tropicaux.

Effectivement, la teneur en  $\text{CaCO}_3$  maximale observée sous *Tamarindus indica* 1 ( $90,20 \text{ g.kg}^{-1}$ ) est largement inférieure à celle de *Milicia excelsa* ( $500 - 700 \text{ g.kg}^{-1}$ ) qui représente environ 5 fois plus de  $\text{CaCO}_3$  (BRAISSANT, 2005).

Par ailleurs, à Biga (Côte d'Ivoire), un iroko de 1,5 m de diamètre a stocké  $8,1 \text{ Mg.m}^{-3}$  de carbonate sur un profil de 1m de profondeur pendant environ  $170 \pm 30$  années (Com. Pers. CAILLEAU, 2012). A Bertoua (Cameroun), un Bahera (*Terminalia bellirica*) de 2,7 m de diamètre a accumulé 3,5 tonnes de carbonates sur environ 200-250 années sur un profil de 1.20 m sous le tronc et 0.7 m à côté du tronc (Com. Pers, CAILLEAU, 2012). Enfin, en Inde, un Bahera (*Terminalia bellirica*) assez jeune, a stocké une tonne de carbonate durant environ 50 années sur un profil d'1 m de profondeur (Com. Pers, CAILLEAU, 2012).

La différence d'âge et de taille des arbres peuvent expliquer les écarts entre les teneurs et les stocks obtenus à Madagascar avec ceux des autres pays tropicaux.

#### **f) Relation entre teneur en $\text{CaCO}_3$ de la biomasse et du sol**

La teneur en  $\text{CaCO}_3$  de la biomasse des espèces étudiées est différente de celle se trouvant dans le sol. Dans la biomasse, *Ficus polita* est celle qui a la teneur en  $\text{CaCO}_3$  maximale alors que dans le sol, c'est celle qui a la teneur minimale, la teneur maximale étant associée à *Tamarindus indica*. Il semblerait donc que la teneur en  $\text{CaCO}_3$  du sol ne soit pas liée à celle de la biomasse. Ceci est compréhensible dans la mesure où les échantillons de biomasse prélevés sont ceux qui ont présentés des traces visibles de calcaire.

#### **g) Aspects phytosociologiques**

L'étude phytosociologique a montré que les arbres oxalogènes appartiennent généralement à la strate supérieure. Ce résultat conforte l'hypothèse selon laquelle le potentiel oxalogène est lié à la hauteur de l'arbre et à son exposition à la lumière qui est déterminant vis-à-vis de l'activité photosynthétique.

Par ailleurs, à Sakaraha, la similarité perçue en termes de familles dominantes (SALICACEAE, PHYLLANTHACEAE et MORACEAE) entre les FDS et les SA suggère que ces dernières sont issues de la dégradation des FDS suite à l'exploitation de bois et au défrichement (PGC PN Zombitse-Vohibasia, 2003). De plus, il a été constaté que les FDS sont plus riches en espèces de la famille des FABACEAE qui figure parmi les principales familles censées être rencontrées dans les FDS africaines (RAJOELISON, 2011). La présence des FABACEAE parmi les principales familles de cette forêt implique que celle-ci a gardé sa flore originelle. D'une certaine manière, la partie explorée dans la forêt de Zombitse est donc peu perturbée. Ce cas n'ayant pas été vérifié dans la FDS de Kirindy à Morondava, celle-ci peut ainsi être qualifiée de perturbée. L'exploitation forestière conduite dans

cette forêt en serait la cause (RAZAFINTSALAMA, 2004). Ainsi, dans les 2 régions d'étude, les arbres oxalogènes sont localisés dans des milieux perturbés ou peu perturbés, probablement en raison de la plus grande disponibilité de lumière dans ces milieux relativement ouverts.

En outre, les familles dominantes communes aux FDS et aux SA de Sakaraha (SALICACEAE, PHYLLANTHACEAE et MORACEAE) peuvent être considérées comme celles qui ont réussi à recoloniser le milieu en dépit de sa dégradation. Parmi elles figure la famille des MORACEAE avec les espèces du genre *Ficus* qui sont particulièrement abondantes dans les SA de cette région. Ces espèces de *Ficus*, qui sont en même temps des espèces oxalogènes, ont apparemment un fort pouvoir de recolonisation des milieux dégradés. Mais on ne saurait dire si cette capacité est propre aux espèces de *Ficus* en elles-mêmes ou à toutes autres espèces oxalogènes.

Quant aux espèces accompagnatrices des spécimens oxalogènes, à Sakaraha, ce sont surtout *Bussea perrieri* (FABACEAE - CESALPINIACEAE), *Bivinia jalbertii* (SALICACEAE) et *Securinega perrieri* (PHYLLANTHACEAE). Toutefois, en ne tenant compte que des placettes relatives à des individus oxalogènes ayant présenté des traces de calcaire au sol, seules *Bussea perrieri* et *Bivinia jalbertii* pourraient être considérées comme telles. Quoi qu'il en soit, ces espèces accompagnatrices ne sont fréquentes qu'au niveau des espèces explorées dans la FDS où la répartition des espèces est souvent liée à la sélection naturelle.

A Morondava, ce sont *Grewia picta* (TILIACEAE), *Cordia myxa* (BORAGINACEAE) et *Tamarindus indica* (FABACEAE-CESALPINIACEAE) qui sont les plus fréquentes. A l'exception de *Grewia picta* (sely), ces espèces accompagnatrices sont aussi oxalogènes.

Compte tenu des faits suscités, il semblerait qu'il n'y ait pas de taxons spécifiques en association stricte avec les espèces oxalogènes.

## 2.2. Discussion sur les hypothèses

Des espèces, présumées oxalogènes, rencontrées dans les milieux d'étude ont donné lieu à de l'effervescence au niveau des parties dégradées du bois sur pied. Pour certains, l'effervescence est encore observée au sol. Les valeurs de pH eau au pied et à 5 m des arbres oxalogènes étant significativement différentes, il existe assez d'évidence pour affirmer qu'il y a eu biominéralisation de calcaire par les espèces oxalogènes.

Aussi, la première hypothèse selon laquelle « Des espèces oxalogènes sont présentes dans la région méridionale et la région occidentale de Madagascar. » est vérifiée.

La deuxième hypothèse qui stipule que « Le potentiel oxalogène y est régi par différents facteurs », est vérifiée (tableau 10). Toutefois, sa confirmation nécessite la considération de la profondeur afin de réduire les variabilités intra-spécifiques.

Tableau 10: Vérification des hypothèses

Hypothèses et sous-hypothèses		Etat	Résultats
H <sub>1</sub> : Des espèces oxalogènes sont présentes dans la région méridionale et la région occidentale de Madagascar.		Vérifiée	Dix espèces oxalogènes ont été identifiées dans la zone d'étude.
H <sub>2</sub> : Le potentiel oxalogène y est régi par différents facteurs	SH <sub>21</sub> : «Le potentiel oxalogène de la région méridionale diffère de celui de la région occidentale. »	Non vérifiée	Les 2 régions ont le même potentiel que ce soit en termes de stock de CaCO <sub>3</sub> qu'en termes de teneur en cet élément.
	SH <sub>22</sub> : « Le potentiel oxalogène varie entre espèces. »	Vérifiée	- En termes de stock de CaCO <sub>3</sub> , il n'y a pas de différence inter-spécifique. - Les teneurs en CaCO <sub>3</sub> diffèrent d'une espèce oxalogène à une autre lorsque la profondeur est prise en compte.
	SH <sub>23</sub> : « Le potentiel oxalogène varie suivant les dimensions des individus. »	Partiellement vérifiée	- La hauteur des arbres est en corrélation moyennement faible avec la teneur et le stock de CaCO <sub>3</sub> . - La relation entre diamètre des arbres avec la teneur et le stock de CaCO <sub>3</sub> n'est pas évidente. - Il y a une corrélation positive entre diamètre et hauteur.

Au vu des résultats de la présente étude, quels sont donc les principaux facteurs qui déterminent le potentiel oxalogène?

➤ Conditions pédoclimatiques

Certes cette hypothèse n'a pas été vérifiée par la présente étude mais elle n'est pas à écarter étant donné que les régions considérées ne sont pas si différentes en termes de caractéristiques pédologiques et climatiques. Par ailleurs, pour connaître réellement l'influence de la région sur le potentiel oxalogène, il fallait comparer des espèces qui se trouvent en même temps dans les 2 régions d'étude.

➤ Appartenance taxonomique

La sous-hypothèse 2 ayant été vérifiée dans cette étude, il est possible d'affirmer que l'appartenance taxonomique est bien un élément clé qui détermine le potentiel oxalogène. Cependant, sa contribution semble être moindre comparée à celle des conditions pédoclimatiques et d'autres

facteurs qui au stade de notre étude ne sont pas encore identifiés. En effet, les cas de *Broussonetia greveana* et d'*Acacia mangium* qui n'ont pas présenté le potentiel oxalogène à Sakaraha alors que des spécimens de ces espèces ont donné de l'effervescence ailleurs permettent d'affirmer qu'il existe d'autres facteurs plus prépondérants que l'appartenance taxonomique de l'espèce dans la voie oxalate-carbonate.

➤ Grandeur de l'arbre

La sous-hypothèse 3 a été partiellement vérifiée puisque la hauteur des arbres est corrélée à la teneur et au stock de  $\text{CaCO}_3$  alors que la corrélation de ces mêmes paramètres avec le diamètre des arbres est faible. D'ailleurs, au niveau des arbres d'une même espèce oxalogène, il existe des variations de taille probablement à l'origine de la variation intraspécifique de la teneur et du stock en  $\text{CaCO}_3$ .

### 3. Recommandations

Quelques recommandations pratiques découlant de cette recherche peuvent être avancées pour une meilleure compréhension de la voie oxalate-carbonate en vue d'une valorisation optimale de ses avantages. Les principaux axes d'orientation suivants ont été proposés dans ce sens.

#### Axe d'orientation 1 : Mener des recherches complémentaires à la présente exploration

Beaucoup de questions et d'autres hypothèses ont surgi de cette étude sans qu'elle ait pour autant réussie à les résoudre. Les plus importantes parmi celles-ci restent les déterminants de l'occurrence de ce phénomène. Aussi, d'autres études plus poussées devraient être conduites afin de les cerner au mieux et de conforter ou de réfuter les résultats émanant de la présente étude qui est restée pour sa part au stade d'exploration.

##### Action 1 : Exploration d'autres zones

La classification des types de sols selon ROEDERER et BOURGEAT (1972) est certes la plus détaillée vis-à-vis de la répartition des sols calcimorphes à Madagascar. Son utilisation a d'ailleurs permis de limiter les risques que les milieux d'étude ne tombent sur des sols calcaires. Toutefois, les réalités sur le terrain peuvent être différentes. Aussi est-il possible d'envisager l'utilisation d'autres classifications pédologiques plus larges entre autres celle de DELENNE et PELLETIER (1981) pour l'exploration dans d'autres zones. Mais, il faudra veiller à prendre les mesures nécessaires pour éviter de mener des recherches sur un sol à variante calcimorphe, entre autres une reconnaissance exploratoire avec vérification sur terrain.

##### Action 2 : Choix minutieux des espèces et des spécimens à explorer

Les espèces oxalogènes déjà identifiées sont à prioriser tout en tenant compte des modes d'usage des terres. Il serait aussi intéressant de cibler des essences forestières à croissance rapide et à vocation de reboisement ou d'afforestation. De ce point de vue, les *Eucalyptus spp* qui ont fait l'objet de plusieurs recherches depuis leurs introductions à Madagascar méritent une attention particulière, notamment *Eucalyptus grandis* et *Eucalyptus deglupta* qui contiendraient des cristaux d'oxalate de

calcium dans le bois (NORMAND et PAQUIS, 1976). Des peuplements de ces espèces existent probablement dans les arboreta et stations forestières de l'île. Il serait donc plus facile de les localiser et de trouver des pieds adultes au cours de l'exploration.

Par ailleurs, dans le choix des espèces à explorer, l'utilisation de critères de choix supplémentaires autres que la présence de cristaux d'oxalate de Ca est nécessaire dans la mesure où peu d'études sont axées sur la détermination de la présence de ces éléments dans des essences forestières. Un exemple de critère pouvant être avancé à cette fin est l'étendue de l'aire de répartition de l'espèce, les espèces ayant présentées les plus forts potentiels selon la présente étude étant des espèces rustiques à large aire de répartition. Ce sont surtout le cas de *Tamarindus indica* et de *Ceiba pentandra*. Des taxons spécifiques associés aux espèces oxalogènes peuvent aussi servir d'indicateurs du phénomène.

Concernant le choix des arbres oxalogènes cibles, il est préférable de faire prévaloir les spécimens plus âgés présentant des traces d'oxalate de Ca au niveau des parties dégradées à la suite de processus naturels comme la sénescence.

Au cours des prélèvements sur terrain, les 3 répétitions pour chaque espèce doivent être respectées. Ceci devrait permettre de réduire les fortes variabilités intra-spécifiques. De même, lors des prélèvements au niveau de chaque arbre oxalogène, il serait préférable de procéder à 3 répétitions pour chaque profondeur d'un même profil.

### **Action 3 : Réalisation d'une étude microbiologique du sol conjointement à une analyse pédologique plus poussée**

Les bactéries telluriques et les champignons rhizosphériques jouent un rôle essentiel dans la voie oxalate-carbonate (BRAISSANT, 2005). Aussi est-il important de mener une étude microbiologique conjointement à une analyse pédologique poussée lors des recherches ultérieures relatives à la voie oxalate-carbonate. En pratique, il faudrait inventorier les microorganismes du sol en se focalisant sur la présence éventuelle de stréptomycètes, de protéobactéries, de champignons saprophytes et de champignons mycorhiziens. Cette démarche pourrait permettre de lever les incertitudes relatives aux conditions d'occurrence de la voie oxalate-carbonate et y donner des éléments de réponses fiables.

En outre, une analyse portant sur d'autres paramètres physico-chimiques des sols est nécessaire afin de disposer d'une base solide pour la détermination du type de sol tout en facilitant l'appréhension des résultats relatifs aux analyses des échantillons. Il s'agit entre autres de l'analyse granulométrique et de la détermination des teneurs en bases échangeables.

### **Axe d'orientation 2 : Valoriser les acquis de la présente étude**

En dépit des limites énoncées précédemment, cette étude relative à l'exploration de la voie oxalate-carbonate dans les régions occidentale et méridionale de Madagascar a apporté de nouvelles connaissances qui pourraient donner lieu à diverses applications liées à la gestion durable des forêts, à la reforestation et à l'agroforesterie, tout en contribuant à l'atténuation du changement climatique.



### **Action 1 : Montage de projets de conservation et de gestion durable des forêts naturelles riches en espèces oxalogènes**

La voie oxalate-carbonate peut contribuer à une valorisation des forêts naturelles, quelque soit leur âge, du moment qu'elles sont riches en espèces biominéralisatrices à potentiel élevé. Dans cette optique, *Tamarindus indica*, une espèce à croissance lente mais ubiquiste et à valeur socio-culturelle notable, est particulièrement intéressante. A cet effet, il faudrait identifier les massifs forestiers incluant cette espèce. Il s'en suit une estimation de l'abondance de cette espèce dans la zone, du stock de calcaire sous ces arbres et de l'équivalence en stock de C. Les projets de conservation et de gestion durable des forêts concernées pourront être financés par la vente du stock de C séquestré.

### **Action 2 : Elaboration d'un projet test de reboisement et/ou de reforestation avec des espèces oxalogènes à potentiel élevé**

Pour cela, il faudrait choisir une ou plusieurs espèce(s) oxalogène(s) à potentiel élevé en vue de la mise en place de forêts artificielles constituées principalement par ces essences. Il faudrait d'abord commencer par une ou 3 espèces oxalogènes sur un périmètre d'essai. Ensuite, une mise au point des techniques culturales de ces essences est nécessaire. Il importe de ne les développer en plantation qu'après avoir fait une étude de marché vis-à-vis des produits à écouler de ce système (bois et stocks de  $\text{CaCO}_3$  et de C). Si le résultat est satisfaisant, des activités de reboisement et/ou de reforestation avec les espèces en questions peuvent être menées. Les forêts établies pourraient avoir une valeur notable en termes de production de bois mais aussi dans le cadre des projets de séquestration de carbone.

Cette proposition concerne aussi bien les espèces oxalogènes natives que les espèces exotiques. Parmi ces dernières, l'iroko est particulièrement intéressante car en plus de son fort potentiel biominéralisateur (VERRECCHIA et *al.*, 1999 In ARAGNO et *al.*, 2010), elle est connue à cause de son bois à haute valeur commerciale très recherché sur le marché européen. Bien que cette espèce ait été introduite dans la partie orientale de Madagascar sans succès apparent (CHAUVET, 1965), il est possible d'envisager d'autres essais d'introduction dans d'autres régions de l'île.

### **Action 3 : Développement de pratiques agro-forestières basées sur des espèces oxalogènes**

L'aptitude des espèces oxalogènes à augmenter le pH du sol tout autour peut être exploitée pour développer des pratiques agro-forestières adaptables aux contextes des différentes régions agricoles malgaches. Ceci afin que des sols longtemps marginalisés puissent être à nouveau cultivés en association avec des essences oxalogènes agroforestières. Il faudrait néanmoins prioriser les cultures à enracinement superficiel vu que l'alcalinisation du sol est plus poussée en surface. Quant au choix des espèces oxalogènes, il faudrait cibler les essences à usages multiples à potentiel élevé comme le tamarinier et les Casuarina.

Tableau 11 : Cadre logique d'intervention

AXE D'ORIENTATION 1 : MENER DES RECHERCHES COMPLEMENTAIRES A LA PRESENTE EXPLORATION					
Résultats attendus	Actions	Activités	Responsables	IOV	Echéance
Les déterminismes de la voie oxalate-carbonate sont connus.	Exploration d'autres zones d'étude	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilisation d'autres classifications pédologiques plus larges comme celle de DELENNE et PELLETIER (1981) pour l'exploration et répartition des zones d'étude dans des régions bioclimatiques différentes</li> <li>- Reconnaissance exploratoire et vérification sur terrain pour éviter de mener des recherches sur un sol à variante calcimorphe</li> </ul>	Instituts de recherche :	Carte de répartition des zones à explorer à Madagascar	Court terme
	Choix minutieux des espèces et des spécimens à explorer	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Priorisation des espèces oxalogènes déjà identifiées avec prise en compte des modes d'usage des terres, de la vitesse de croissance et de leurs vocations sylvicoles</li> <li>- Utilisation de critères de choix supplémentaires des espèces autres que la présence de cristaux d'oxalate de Ca</li> <li>- Choix des spécimens plus âgés présentant des traces d'oxalate de Ca au niveau des parties dégradées à la suite de processus naturels</li> <li>- Respect des répétitions lors de l'échantillonnage (nombre de spécimens, nombre d'échantillons pédologiques)</li> </ul>	LRI – IRD ; ESSA-Forêt ; Département de Recherches Forestières et Piscicoles (DRFP) ; Centre National de Recherches sur l'Environnement (CNRE) ...	Liste exhaustive des espèces oxalogènes à explorer à Madagascar	Moyen terme
	Réalisation d'une étude microbiologique du sol conjointement à une analyse pédologique plus poussée	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Etude de la communauté fongique et bactériologique du sol : détermination de la présence de streptomycètes, protéobactéries et de champignons saprophytes et mycorhiziens</li> <li>- Etude d'autres paramètres physico-chimiques des sols : analyse granulométrique et détermination de la teneur en bases échangeables...</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Liste des bactéries et/ou champignons associés aux spécimens étudiés</li> <li>- Caractéristiques pédologiques du sol</li> </ul>	

**AXE D'ORIENTATION 2 : VALORISER LES ACQUIS DE LA PRESENTE ETUDE**

Résultats attendus	Actions	Activités	Responsables	IOV	Echéance
Les avantages de la voie oxalate-carbonate sont exploités.	Montage de projets de conservation et de gestion durable (PCGD) des forêts naturelles riches en espèces oxalogènes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identification des massifs forestiers incluant des espèces à potentiel élevé</li> <li>- Estimation de l'abondance de cette/ces espèce(s) dans la zone, du stock de calcaire sous ces arbres et de l'équivalence en stock de C</li> <li>- Conclusion du contrat de vente du C séquestré</li> <li>- Mise en œuvre d'un PCGD des forêts concernées financé par la vente du stock de C</li> </ul>	Entité / Organisme œuvrant dans le domaine de la conservation de la biodiversité : Conservation International (C.I.) ; Madagascar National Parks (M.N.P.) ; World Wide Fund For Nature (WWF) ...	Document de projet	Moyen terme
	Elaboration d'un projet test de reboisement et/ou de reforestation avec des espèces oxalogènes à potentiel élevé	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Choix d'une ou plusieurs espèce(s) oxalogène(s) à potentiel élevé</li> <li>- Essais</li> <li>- Mise au point des techniques culturales de ces espèces</li> <li>- Développement en plantation après étude de marché vis-à-vis des produits (bois et stock de CaCO<sub>3</sub>/ de C).</li> </ul>	ONG et Sociétés privées intéressées	Existence de site fonctionnel	Moyen terme
	Développement de pratiques agro-forestières basées sur des espèces oxalogènes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identification des zones d'intervention selon l'aire de répartition des espèces oxalogènes cibles (à usages multiples, potentiel optimal)</li> <li>- Conception technique et étude de faisabilité du système agro-forestier</li> <li>- Mise en place du dispositif expérimental</li> <li>- Suivi et évaluation technique</li> </ul>	Instituts de recherche : ESSA ; LRI – IRD ; Centre Technique Horticole de Tamatave (CTHT) ...	Fiches techniques sur ces pratiques	Moyen terme

## **PARTIE 5 : CONCLUSION**

---

## CONCLUSION

La voie oxalate-carbonate, rencontrée dans des pays tropicaux et sur des sols acides, a été retrouvée à Madagascar dans les régions méridionale et occidentale où les conditions pédobioclimatiques nécessaires à l'induction de ce phénomène ont été réunies.

La présente étude a permis de mettre en évidence l'existence de cette voie par l'identification d'espèces oxalogènes dans ces régions. Sur les 12 espèces explorées dans les régions d'étude, 10 espèces sont effectivement oxalogènes et parmi elles, seule *Ceiba pentandra* figure dans la liste des espèces oxalogènes de la littérature. Ainsi, les 9 espèces restantes, à savoir *Ficus marmorata*, *Ficus polita*, *Ficus sycomorus*, *Ficus sp* (MORACEAE), *Casuarina cunninghamiana*, *Casuarina equisetifolia* (CASUARINACEAE), *Tamarindus indica* (FABACEAE S.f. CAESALPINIOIDEAE), *Cordia myxa* (BORAGINACEAE) et *Broussonetia greveana* (MORACEAE) sont des espèces dont les potentiels oxalogènes n'ont été découverts que dans cette partie de l'île.

L'étude phytosociologique a montré que les arbres oxalogènes sont localisés dans la strate supérieure et se trouvent généralement dans des milieux perturbés, à la limite peu perturbés, ce qui leur permet d'être nettement plus exposés à la lumière. Quant aux espèces accompagnatrices des spécimens oxalogènes, il semblerait que leur répartition soit liée à la sélection naturelle puisqu'aucune association stricte des espèces oxalogènes avec des taxons spécifiques n'a été mise en évidence.

Même si le stock de  $\text{CaCO}_3$  sur 30 cm de profondeur à Morondava ( $38,78 \pm 32,58 \text{ Mg.ha}^{-1}$ ) est largement supérieur à celui trouvé à Sakaraha ( $19,19 \pm 20,36 \text{ Mg.ha}^{-1}$ ), les potentiels oxalogènes dans les 2 régions se sont avérés être égaux ( $p\text{-value} = 0,18$ ). Cette égalité reste valable même au niveau des espèces tant que la variable profondeur n'est pas prise en compte. En effet, les différences en termes de teneur en  $\text{CaCO}_3$  ne sont significatives que pour la profondeur 0-10 cm ( $p\text{-value} < 0,0001$ ). Entre espèces, *Ficus polita* ( $7,15 \pm 3,57 \text{ Mg.ha}^{-1}$ ) est celle qui a le potentiel oxalogène le plus faible alors que les plus élevés sont ceux de *Ceiba pentandra* ( $58,54 \pm 25,36 \text{ Mg.ha}^{-1}$ ) et de *Tamarindus indica* ( $54,28 \pm 41,66 \text{ Mg.ha}^{-1}$ ). Toutefois, comparés aux potentiels d'autres espèces fortement biominéralisatrices dans d'autres pays tropicaux, ceux-ci restent relativement faibles. La différence des arbres oxalogènes en termes de diamètre et de hauteur, en plus des conditions pédo-climatiques, seraient la cause de cette divergence.

Par ailleurs, dans la mesure où seuls les endroits facilement accessibles ont été explorés dans cette zone, il est possible d'affirmer que Madagascar a probablement un fort potentiel en termes d'espèces oxalogènes. Mais pour le valoriser au mieux, il est nécessaire de renforcer les explorations des espèces dans la zone étudiée ou dans d'autres zones. Enfin, la grande variabilité du potentiel oxalogène, observée tant au niveau des régions d'étude que des espèces oxalogènes, suggère l'existence d'autres paramètres tout aussi déterminants dans la voie oxalate-carbonate mais qui n'ont pas été pris en compte au cours de cette étude. La question qui se pose est alors la suivante : de quels paramètres s'agit-il exactement ?

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDRIAMISAINTSOA S., (2010). *Etude des potentialités de la forêt de transfert de gestion de Hazoroa en vue de la production de bois de charbon dans la commune Sakaraha, district de Sakaraha.*
- ARAGNO M., VERRECCHIA E., JOB D., CAILLEAU G., BRAISSANT O., KHAMMAR N., KATIA F., MOTA M., GUGGIARI M. et MARTIN G., (2010). Calcium carbonate biomineralization in ferrallitic, tropical soils through the oxalate-carbonate pathway. *Bulletin BGS 30.*
- BLASER J., RAJOELISON G., TSIZA G., RAJEMISON M., RABEVOHITRA R., RANDRIANJAFY H., RAZAFINDRIANILANA N., RAKOTOVAO G. et COMTET S., Décembre (1993). Choix des essences pour la sylviculture à Madagascar. *Akon'ny ala 12-13.*
- BOUROU S. (2012). *Étude éco-physiologique du tamarinier (Tamarindus indica L.) en milieu tropical aride*, Thèse de Doctorat (PhD), Faculté des Sciences en Bio-Ingénieries, Université de Gand, Belgique.
- BRAISSANT O. (2005). *Carbonatogénèse bactérienne liée au cycle biogéochimique oxalate-carbonate. Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel.* Thèse présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel pour l'obtention du grade de Docteur ès Science.
- BRINK M. (2008). *Canarium madagascariense* Engl. Fiche de Protabase. Louppe, D., Oteng-Amoako, A.A. & Brink, M. (Editeurs). PROTA (Plant Resources of Tropical Africa / Ressources végétales de l'Afrique tropicale), Wageningen, Pays Bas.
- CEA (2006). Mémento sur l'énergie-Edition 2006
- CHAUVET B. (1965). Inventaire des espèces forestières introduites à Madagascar. Ecole nationale supérieure agronomique (Tananarive). Impr. centrale.
- COOKE B., BURREN J. et RAKOTONIAINA M., (2009). Fampanandrosoana ny fambolena-kazo. Diffusion Ministère de l'Environnement, des Forêts et du Tourisme (MEFT) et USAID.
- CTFT (1961). Fiches sur les essences de reboisement : (caractères sylvicoles et méthodes de plantation): *Casuarina equisetifolia*. *Bois et Forêts des Tropiques*, n°79.
- DE BOECK et LARCIER, (2006). Dico de Bio 2ème Edition.
- DUCHAUFOR P. (1995). Pédologie sol, végétation, environnement. 4<sup>ème</sup> édition. Paris. Masson
- FAO (1997). Aquaculture Feed and Fertilizer Resource Atlas of the Philippines.
- GIEC (2011). Gérer les risques d'événements extrêmes et de catastrophes en vue d'une meilleure adaptation aux changements climatiques.
- GIEC (2007). Changements climatiques 2007. Quatrième rapport d'évaluation.
- GIEC (2006). Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre.
- GIEC (2001). Bilan 2001 des Changements Climatiques: Mesures d'atténuation. W.R.H.J.Y.D.WGI.
- GOBAT J.M., ARAGNO M. et MATTHEY W., (2010). Le sol vivant : bases de pédologie, biologie des sols. PPUR (Presses Polytechniques et Universitaires Romandes). 3ème édition. 820p.



- GOLAY A. et DIETRICH F., (2012). *La voie oxalate-carbonate dans les Ferrallitisols du Cameroun Etude du cycle du Ca et impact sur l'environnement*. Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master Biogéosciences. Université de Neuchâtel, Faculté des Science et Université de Lausanne, Faculté des géosciences et de l'environnement.
- GOVERNMENT OF INDIA (1990). The ayurvedic pharmacopoeia of India. Part I. Volume V.
- GRINAND C., RAJAONARIVO A., BERNOUX M., PAJOT V., BROSSARD M., RAZAFIMBELO T., ALBRECHT A., et LE MARTRET H., (2009). Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar, *Étude et Gestion des Sols*, **16**: 23 à 33.
- GUGGIARI M. (2011). *Rôle des champignons dans la voie oxalate-carbonate*. Thèse doctorale. Université de Lausanne.
- HARMON D. (2002). In Light of Our Differences: How Diversity in Nature and Culture Makes Us Human. Washington, DC: Smithsonian Institution Press.
- IBRAHIM J. A., AYODELE E. A., JEGEDE A. I. et KUNLE I. F., (2006). Comparative studies on *Khaya* A. Juss (Meliaceae) in Nigeria. *African Journal of Biotechnology* Vol. 5 (11).2 June 2006.
- IPCC (2007). Climate Change 2007 Mitigation of Climate Change - Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In. Cambridge University Press, Cambridge.
- JACCOTTET A. (2010). Découverte de l'Université de Lausanne: le caillou de l'iroko pour lutter contre le CO<sub>2</sub>. *ANIMAN [N° 156]*
- KHASA P., FURLAN V. et LUMANDE K., 1990. Symbioses racinaires chez quelques essences forestières importantes au Zaïre. *Bois et Forêts des Tropiques* N° 224.
- TOUSSAINT G. (2012). « L'Iroko, l'arbre à carbone. ». *Libre Belgique*, revue de presse du 17/07/2012.
- LOUPPE D., OTENG-AMOAKO A.A. et BRINK M., 2008. Ressources végétales de l'Afrique tropicale 7 (1). Bois d'œuvre 1. [Traduction de: Plant Resources of Tropical Africa7 (1). Timber 1. 2008]. Fondation PROTA. Wageningen, pays-Bas. Backhuys publishers. CTA. 785p.
- MACKEY M. (1996). *Acacia mangium*: an important multipurpose tree for the tropic lowlands. FACT Sheet 96-03. June 1996. A quick guide to multipurpose trees from around the world. Winrock international.
- MADANI D. (2008). *Relation entre le couvert végétal et les conditions édaphiques en zone à déficit hydrique*. Faculté des sciences, Département d'agronomie. Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magister en Sciences Agronomiques, spécialité : Protection de l'environnement, option : Gestion des ressources naturelles Et environnement. Université de Batna (Algérie).
- MATTEO M. (2011). The oxalate-carbonate pathway: From the scientific research to the application. <http://www.asso-roots.org>
- MEF et UNEP, (2010). Quatrième rapport de la Convention sur la Diversité Biologique.
- MONTAGNAC P. (1960). La culture du kapokier à Madagascar en 1960. Document N°10. Institut de Recherches Agronomiques à Madagascar (IRAM) Tananarive.

- NORMAND D. (1988). A propos des bois de rose de Madagascar. *Bois et Forêts des Tropiques* N° 217.
- NORMAND D. et PAQUIS J., (1976). Manuel d'identification des bois commerciaux. Tome 2 Afrique guinéo-congolaise. Centre Technique Forestier Tropical (CTFT).
- NORMAND D., SALLENAVE P. et ROTHE P. L., (1960). Les ébènes dans le monde. *Bois et Forêts des Tropiques* N° 72.
- NWOSU (2011). The Effects of Processing on the Anti-Nutritional Properties of 'Oze' (*Bosqueia angolensis*) Seeds. *Journal of American Science* 2011; 7 (1).
- OKONKWO T., OKORIE O., OKONTA J., OKONKOW C., (2010). Sub-chronic Hepatotoxicity of *Anacardium occidentale* (Anacardiaceae) Inner Stem Bark Extract in Rats
- ONGUENE AWANA N. (1999). Abondance et distribution des associations mycorhiziennes en forêt tropicale humide du sud Cameroun. Séminaire FORAFRI de Libreville – Session 2 : connaissance de l'écosystème.
- OUDHIA P. (2007). *Cordia myxa* L. Fiche de Protabase. Schmelzer, G.H. & Gurib-Fakim, A. (Editeurs). PROTA (Plant Resources of Tropical Africa / Ressources végétales de l'Afrique tropicale), Wageningen, Pays Bas.
- PANCRACIO A. et LAFLAQUIÈRE M.T., (2002). Biologie et physiologie de la nutrition : la nutrition des plantes. CNPR.
- PARTON W. J., SCURLOCK J. M. O., OJIMA D. S., GILMANOV T. G., SCHOLES M. C., SCHIMEL D. S., KIRCHNER T., MENAUT J.-C., SEASTEDT T., GARCIA MOYA E., KAMNALRUT A. AND KINYAMARIO J. I., (1993). 'Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide'. *Global Biogeochemical Cycles*, 7: 785-809.
- PERRIER R., AUFFRET VAN DER KEMP T., et ZONZAIN F., (1997). Biosciences et techniques : expériences faciles et moins faciles en sciences biologiques. DOIN Editeurs.
- PGC PN Zombitse-Vohibasia (2003)
- QUENEA K. (2004). *Etude structurale et dynamique des fractions lipidiques et organiques réfractaires de sols d'une chronoséquence forêt/maïs (Cestas, sud ouest de la France)*. Thèse de doctorat de l'Université Paris VI. Spécialité : Fonctionnement physique, chimique et biologique de la biosphère continentale.
- RABEZANDRINA R. (1993). Caractérisation des principaux sols Malgaches et les conséquences Agronomiques qui en découlent. Terre-mg23.
- RAJOELINA J.B. (2008). *Analyse de l'influence des types de sol sur la couverture végétale de la forêt de Kirindy-Morondava*. Mémoire de fin d'études ESSA - Forêts.
- RAKOTOARIMANANA V. (2002). *Feu, pâturage et dynamique des savanes à Heteropogon contortus (L.) P. Beauv. ex Roem. & Shult. dans le sud-ouest de Madagascar (région de Sakaraha)*. Thèse de doctorat de troisième cycle, option écologie végétale. Université d'Antananarivo

- 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*. Mémoire de DEA ESSA-Forêt.
- RAKOTONDRAZAFY S.R. (2012). *Contribution à l'étude des indicateurs biologiques et écosystémiques du changement climatique dans les régions bioclimatiques de Madagascar*. Mémoire de fin d'études ESSA - Forêts.
- RANDRIAMBOAVONJY J.C. (1996). Les principaux pédopaysages à Madagascar.
- RAO K. S. et DAVE Y.S., (1984). Occurrence of crystals in vascular cambium. *Protoplasma*, Volume 119, Issue 3.
- RASPLUS J.-Y. (2002). TBA. Malagasy Ficus.
- RAUNET M. (1997). Les ensembles morphologiques de Madagascar.
- RAZAFIMAHATRATRA H.M. (2011). *Sols malgaches et spectroscopie dans le moyen Infrarouge : classification, caractérisation et sensibilité au climat*. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques. Université d'Antananarivo
- RAZAFINTSALAMA V. (2004). *Impacts du type d'exploitation sur la diversité floristique de la forêt de Kirindy (Morondava)*. Mémoire de DEA ESSA-Forêt.
- RAZAFIMAMONJISON D. (2007). *Etude de la variabilité qualitative et quantitative de l'huile essentielle de Cedrelopsis grevei en vue d'une meilleure valorisation*. Mémoire de DEA ESSA-Forêt.
- RICHTER H. et DALLWITZ M., (2009). Bois commerciaux.
- TOSTAIN S. (2010). Espèces de palétuviers dans les mangroves de Toliara. FORMAD Environnement.
- TRANS-MAD'DEVELOPPEMENT (2006). La filière de construction de goélettes des chantiers navals de Belo sur mer et les problématiques d'approvisionnement en matière première.
- UE (2011). Les sols: la face cachée du cycle climatique.
- UNICOM (2009). Les Universités de Neuchâtel et de Lausanne participent à la lutte contre l'effet de serre. Communiqué de presse – mardi 3 février 2009. Service de communication et d'audiovisuel.
- ZINDLER-FRANCK E. (1987). Oxalate biosynthesis in relation to photosynthetic pathway and plant productivity: a survey.

**Site internet:**

- <http://www.uclouvain.be/320043.html> consulté le 29 mars 2012
- [http:// www.database.prota.org/recherche.htm](http://www.database.prota.org/recherche.htm), visité le 8 octobre 2012:
- <http://www.tropicos.org/Project/MADA> consulté en 2012

**Communication personnelle :**

- CAILLEAU G. (2012)
- VERRECHIA E. (2012)

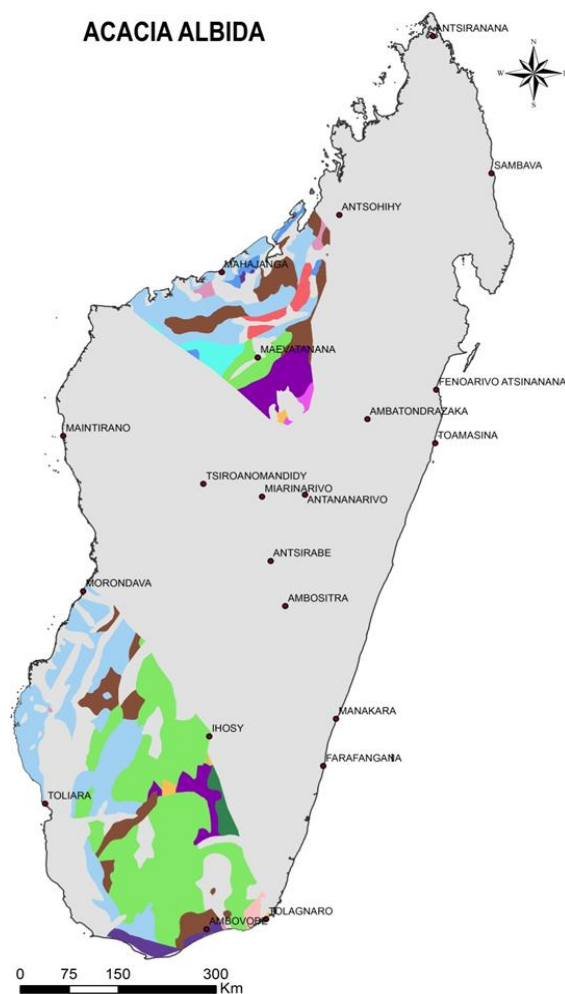
**Cours de Sylviculture des forêts naturelles : RAJOELISON L. G. (2011).**

# ANNEXES

Annexe 1: Cartes de correspondance aire de répartition-type de sol des espèces à explorer

<b>Espèces</b>	<b>Familles</b>
<i>Acacia albida</i>	FABACEAE
<i>Acacia auriculiformis</i>	FABACEAE
<i>Acacia mangium</i>	FABACEAE
<i>Anacardium occidentale</i>	ANACARDIACEAE
<i>Azadirachta indica</i>	MELIACEAE
<i>Broussonetia greveana</i>	MORACEAE
<i>Canarium madagascariensis</i>	BURSERACEAE
<i>Casuarina equisetifolia</i>	CASUARINACEAE
<i>Cedrelopsis grevei</i>	MELIACEAE
<i>Ceiba pentandra</i>	BOMBACACEAE
<i>Dalbergia baroni</i>	FABACEAE
<i>Dalbergia madagascariensis</i>	FABACEAE
<i>Dalbergia maritima</i>	FABACEAE
<i>Delonix regia</i>	FABACEAE
<i>Diospyros gracilipes</i>	EBENACEAE
<i>Ficus lutea</i>	MORACEAE
<i>Ficus tiliifolia</i>	MORACEAE
<i>Gmelina arborea</i>	VERBENACEAE
<i>Heritiera littoralis</i>	STERCULIACEAE
<i>Intsia bijuga</i>	FABACEAE
<i>Khaya madagascariensis</i>	MELIACEAE
<i>Melia azedarach</i>	MELIACEAE
<i>Pterygota madagascariensis</i>	STERCULIACEAE
<i>Tamarindus indica</i>	FABACEAE
<i>Tectona grandis</i>	VERBENACEAE
<i>Terminalia catappa</i>	COMBRETACEAE
<i>Terminalia superba</i>	COMBRETACEAE
<i>Terminalia tetrandra</i>	COMBRETACEAE
<i>Trema orientalis</i>	ULMACEAE
<i>Trilepisium madagascariensis</i>	MORACEAE
<i>Xylocarpus granatum</i>	MELIACEAE

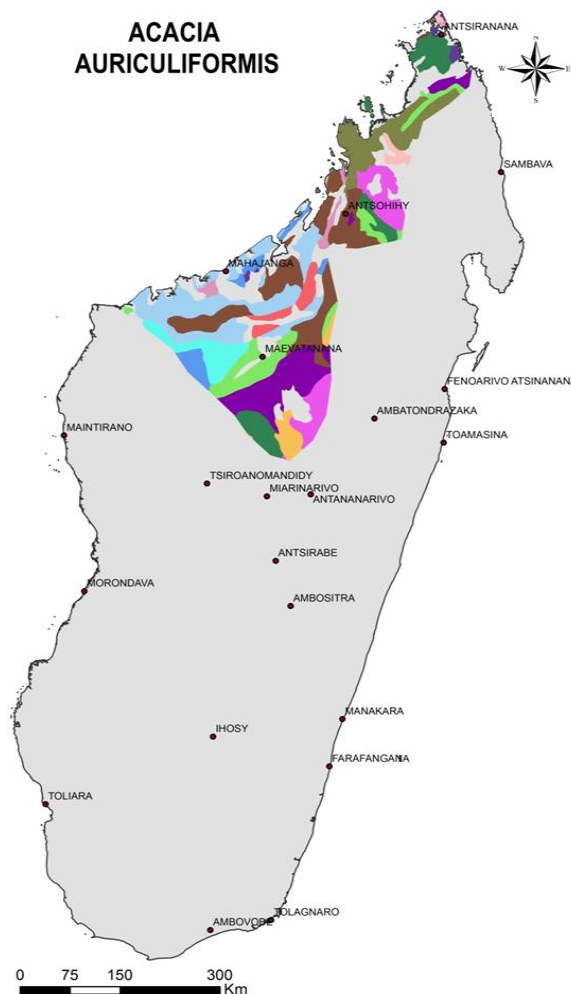
## ACACIA ALBIDA



### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques rouge+jaune/rouge
- Complexe lithosols, sols calcimorphes et sols hydromorphes
- Complexe lithosols, sols calcimorphes, vertisols et rouges méditerranéens
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Complexe ferrugineux tropicaux et sols rouges méditerranéens
- Sols calcimorphes
- Sols faiblement ferrallitiques et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux
- Sols ferrugineux tropicaux - roches sableuses

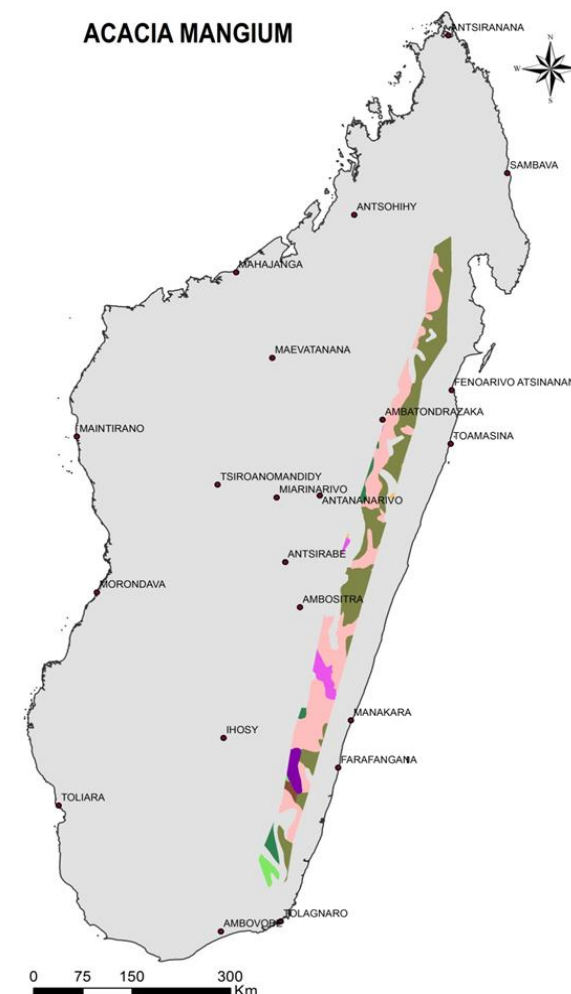
## ACACIA AURICULIFORMIS



### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge+jaune/rouge
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Complexe ferrugineux tropicaux et sols rouges méditerranéens
- Sols calcimorphes
- Sols faiblement ferrallitiques et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux
- Sols ferrugineux tropicaux - roches sableuses

## ACACIA MANGIUM

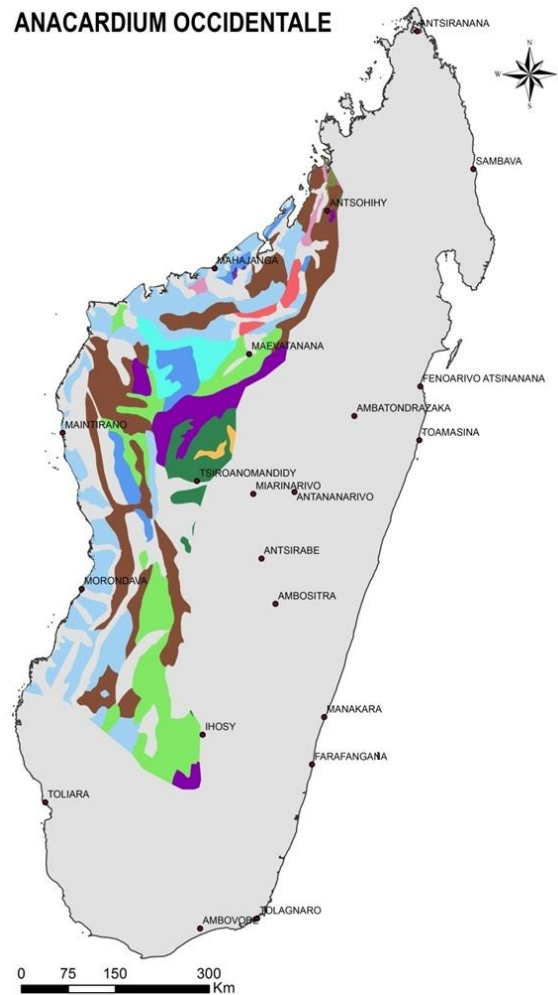


### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge+jaune/rouge
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Sols faiblement ferrallitiques et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux



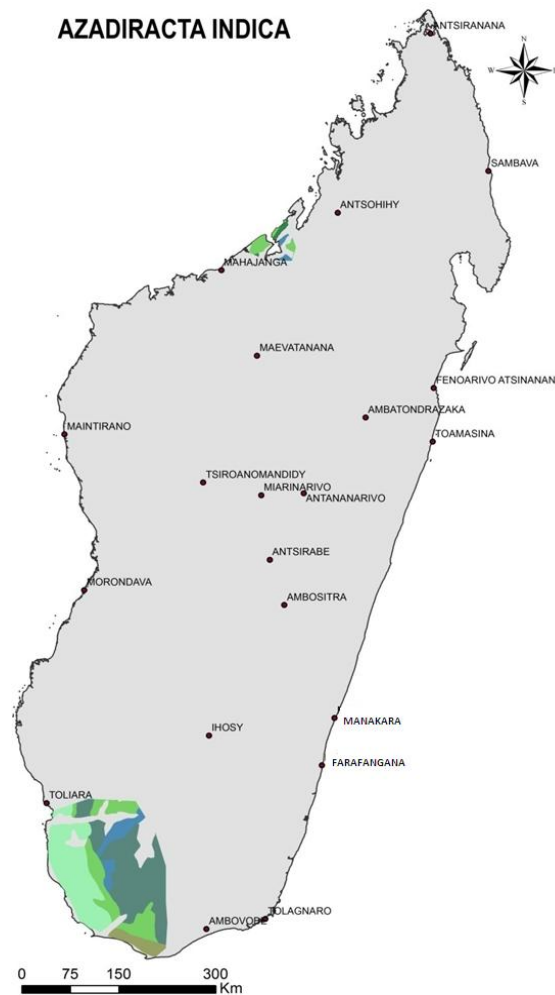
## ANACARDIUM OCCIDENTALE



### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Complexe lithosols et sols calcimorphes
- Complexe lithosols, sols calcimorphes et sols hydromorphes
- Complexe lithosols, sols calcimorphes, vertisols et rouges méditerranéens
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Sols faiblement ferrallitiques et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux
- Sols ferrugineux tropicaux – roches sableuses

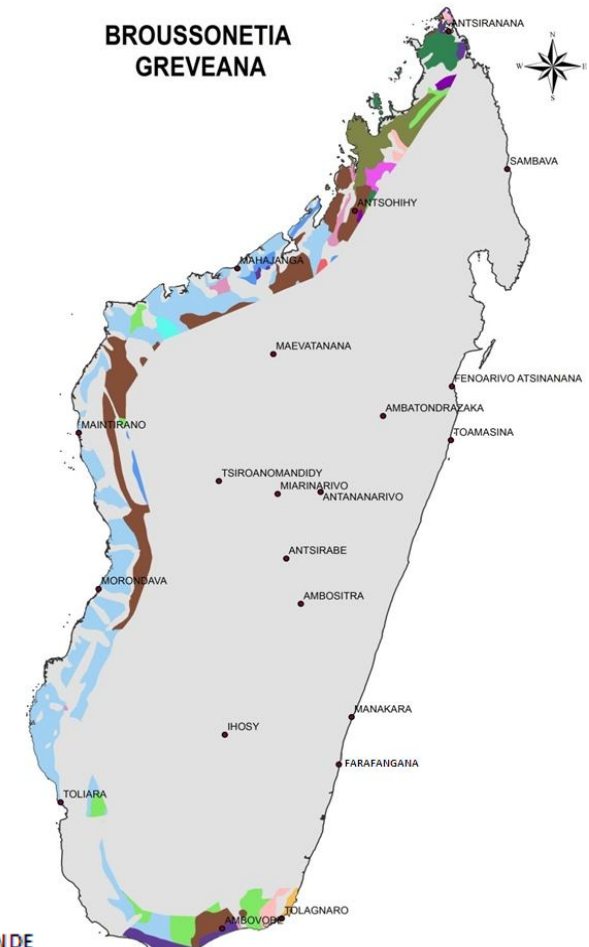
## AZADIRACTA INDICA



### LEGENDE

- Complexe lithosols et sols calcimorphes
- Complexe sols calcimorphes + sols groupe rouges méditerranéens
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et sols rouges méditerranéens
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux
- Sols ferrugineux tropicaux – roches sableuses

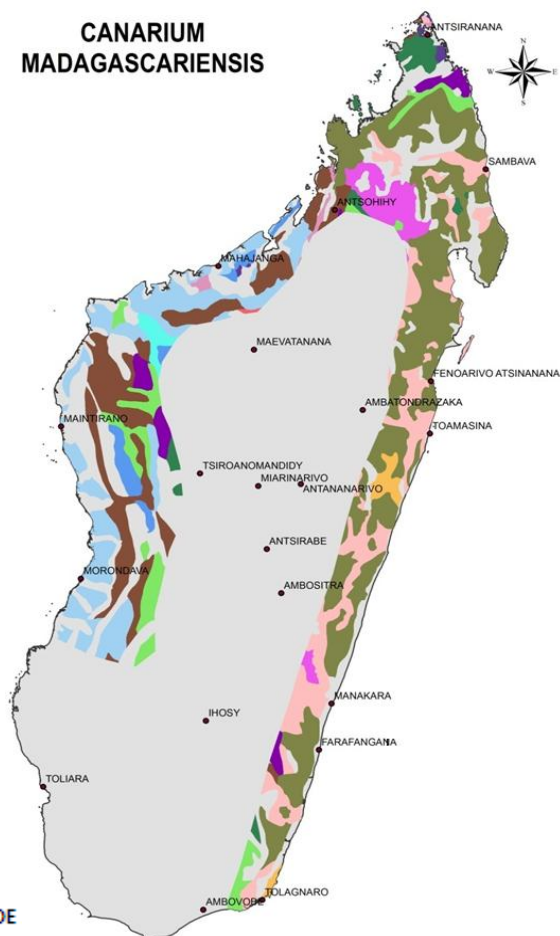
## BROUSSONETIA GREVEANA



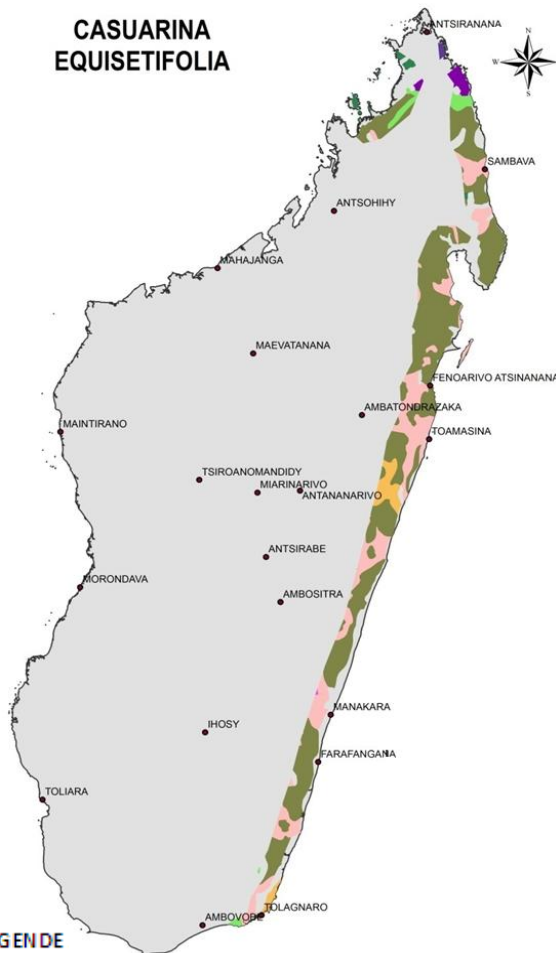
### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge
- Complexe lithosols et sols calcimorphes
- Complexe lithosols, sols calcimorphes et sols hydromorphes
- Complexe lithosols, sols calcimorphes, vertisols et rouges méditerranéens
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et sols rouges méditerranéens
- Sols calcimorphes
- Sols faiblement ferrallitiques et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux
- Sols ferrugineux tropicaux – roches sableuses

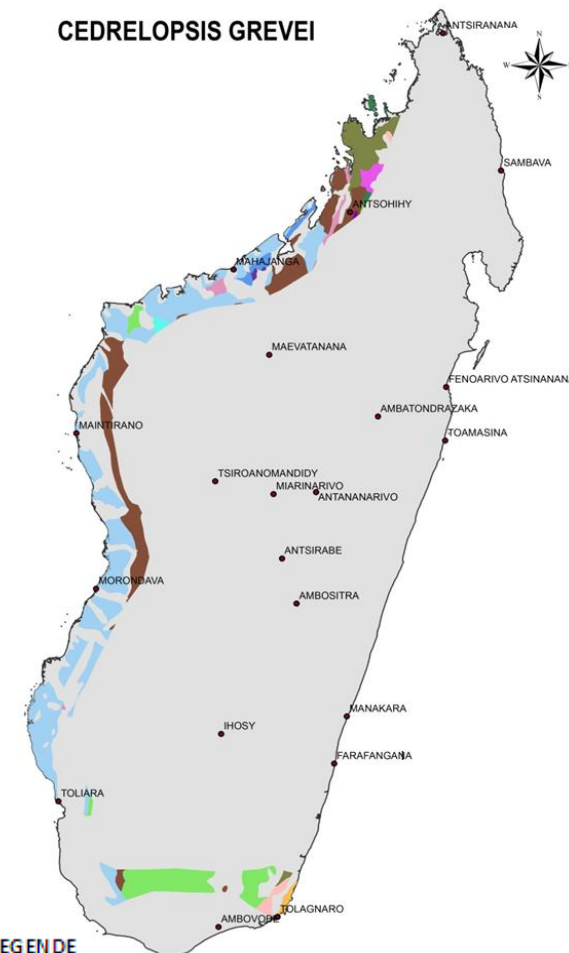
## CANARIUM MADAGASCARIENSIS



## CASUARINA EQUISETIFOLIA



## CEDRELOPSIS GREVEI



### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge
- Complexe lithosols et sols calcimorphes
- Complexe lithosols, sols calcimorphes et sols hydromorphes
- Complexe lithosols, sols calcimorphes, vertisols et rouges méditerranéens
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et sols rouges méditerranéens
- Sols calcimorphes
- Sols faiblement ferrallitiques et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux
- Sols ferrugineux tropicaux – roches sableuses

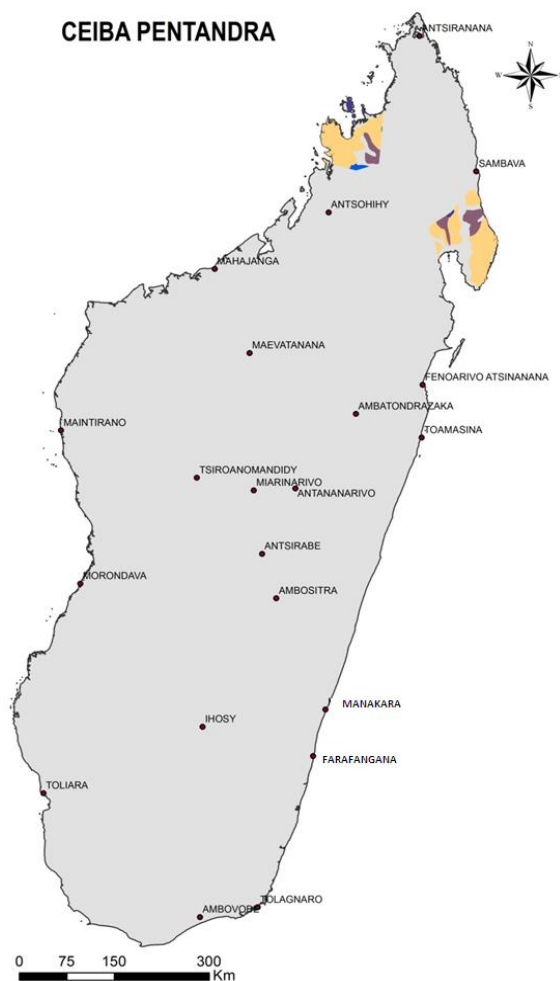
### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et sols rouges méditerranéens
- Sols faiblement ferrallitiques et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux

### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge
- Complexe lithosols et sols calcimorphes
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Sols calcimorphes
- Sols faiblement ferrallitiques et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux
- Sols ferrugineux tropicaux – roches sableuses

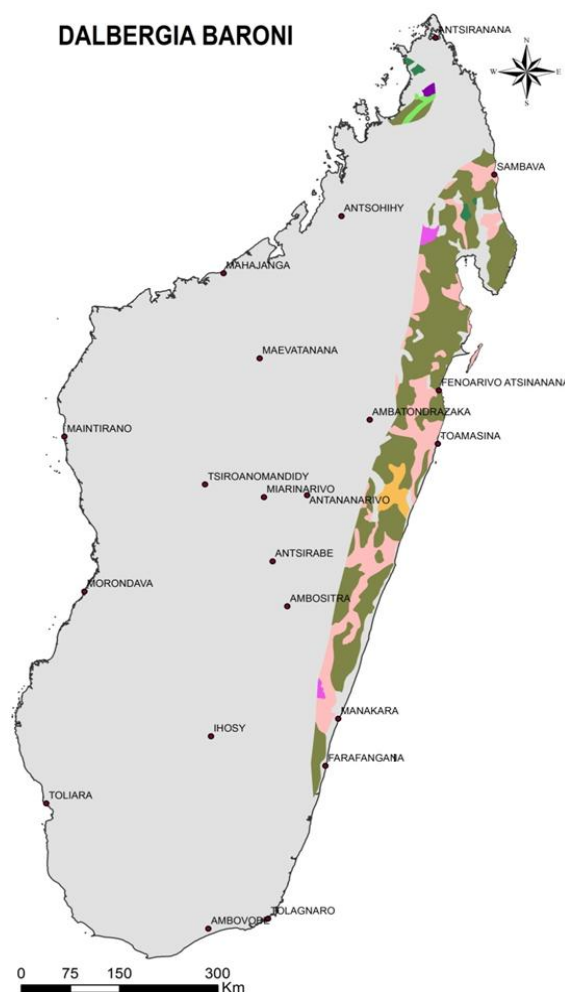
## CEIBA PENTANDRA



### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques rouges

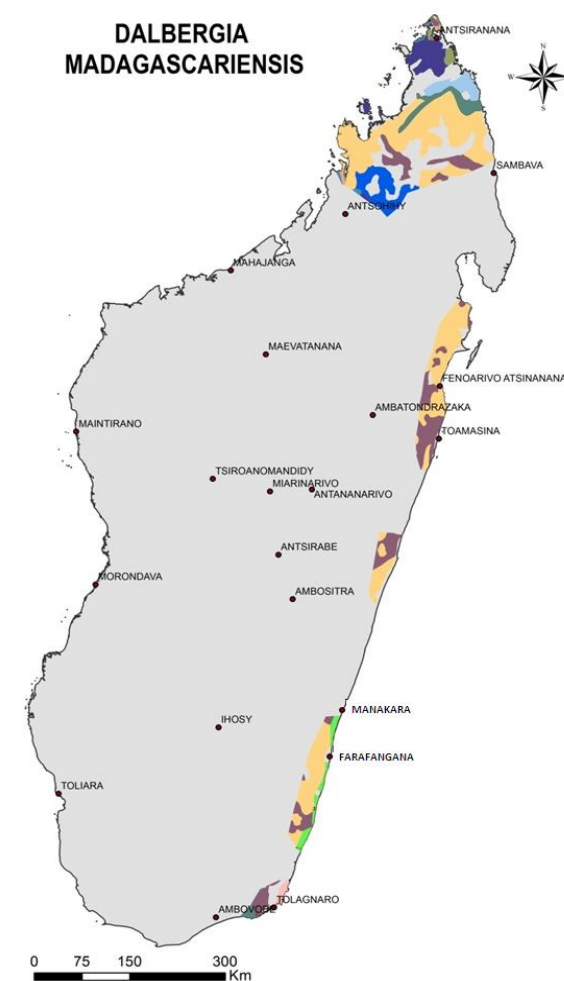
## DALBERGIA BARONI



### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge
- Complexe lithosols et sols calcimorphes
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et sols rouges méditerranéens
- Sols faiblement ferrallitiques et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux

## DALBERGIA MADAGASCARIENSIS

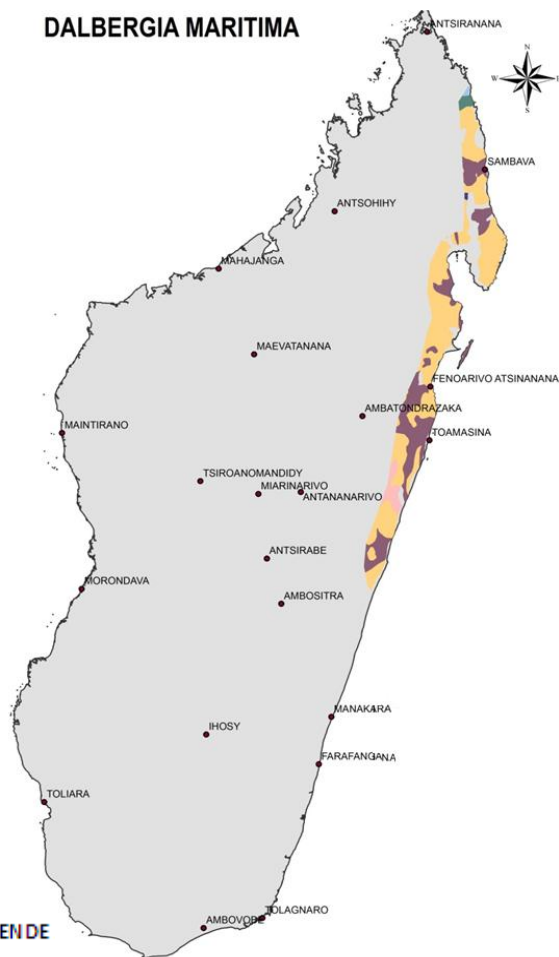


### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge + sols peu évolués
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge
- Complexe lithosols et sols calcimorphes
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges



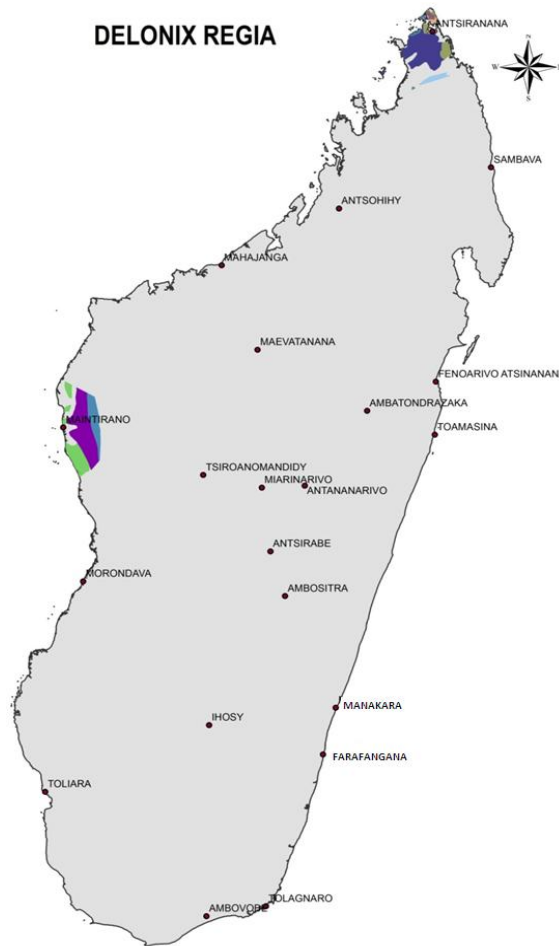
## DALBERGIA MARITIMA



### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges

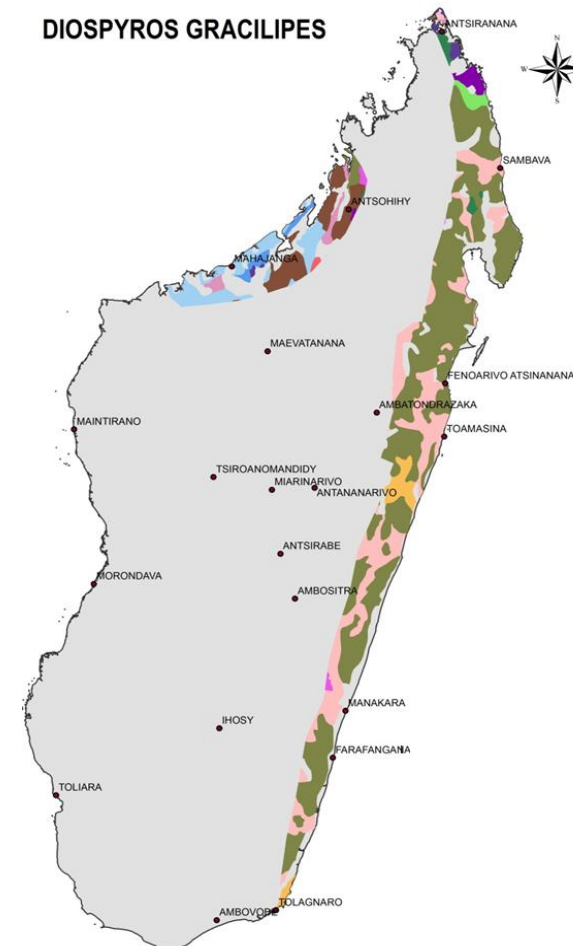
## DELONIX REGIA



### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge
- Complexe lithosols et ferrugineux tropicaux et – Roches volcaniques
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et sols rouges méditerranéens
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux

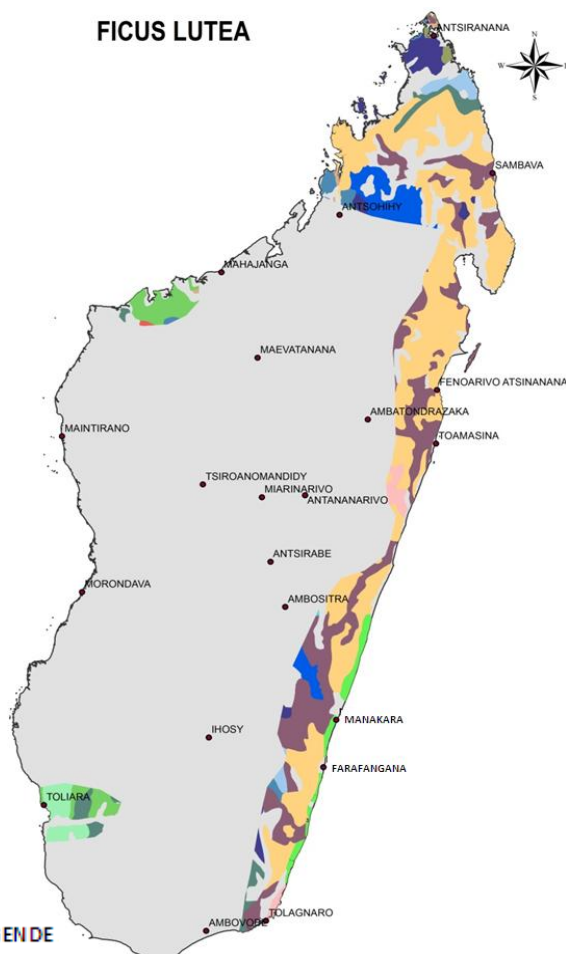
## DIOSPYROS GRACILIPES



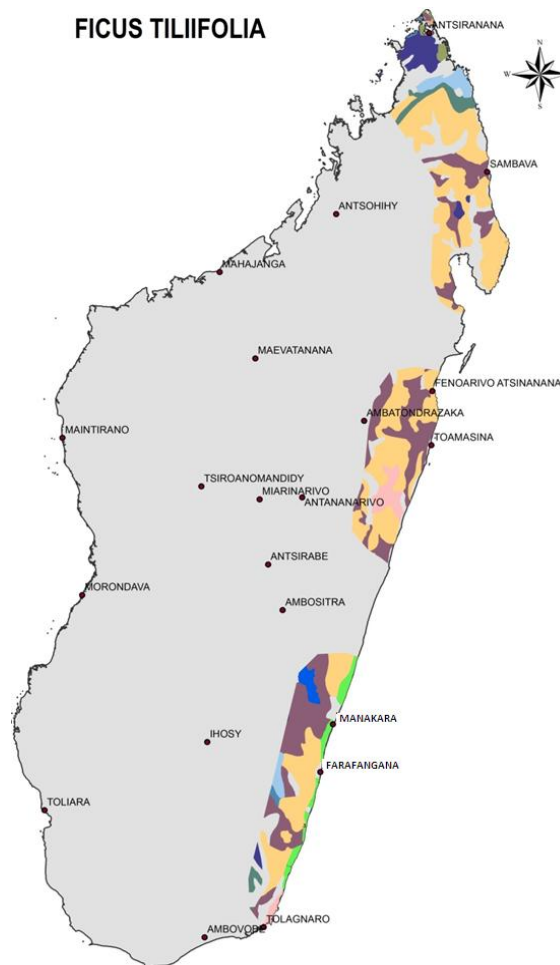
### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge
- Complexe lithosols et sols calcimorphes
- Complexe lithosols, sols calcimorphes et sols hydromorphes
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et sols rouges méditerranéens
- Sols calcimorphes
- Sols faiblement ferrallitiques et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux
- Sols ferrugineux tropicaux – roches sableuses

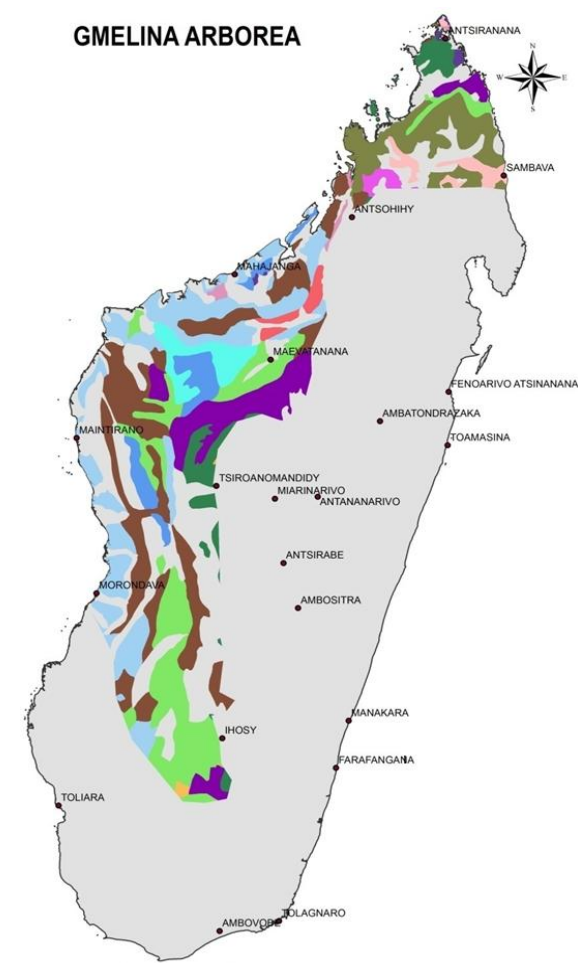
## FICUS LUTEA



## FICUS TILIIFOLIA



## GMELINA ARBOREA



### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge + sols peu évolués
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge
- Complexe lithosols, sols calcimorphes, vertisols et rouges méditerranéens
- Complexe sols calcimorphes + sols groupe rouges méditerranéens
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et sols rouges méditerranéens
- Sols calcimorphe
- Sols faiblement ferrallitique et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux
- Sols ferrugineux tropicaux – roches sableuses

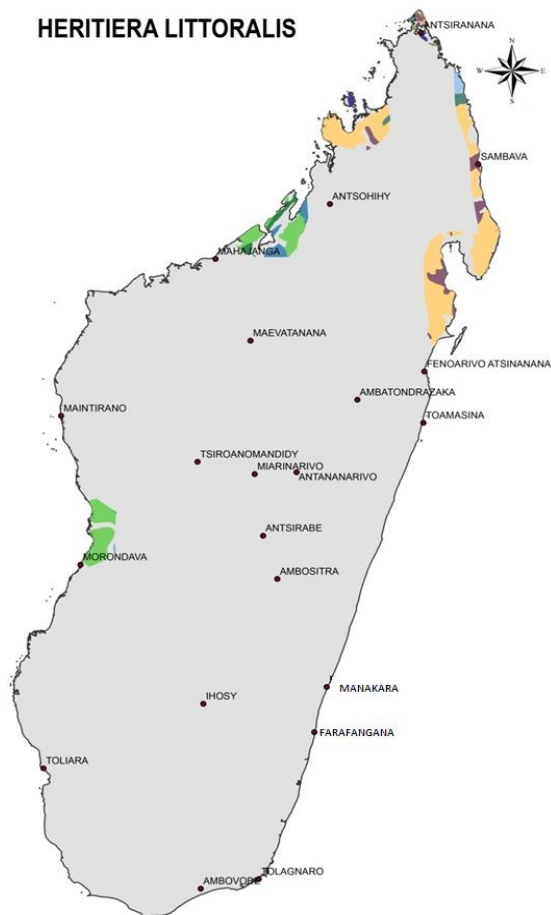
### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge + sols peu évolués
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et sols rouges méditerranéens
- Sols calcimorphe
- Sols faiblement ferrallitique et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux

### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge
- Complexe lithosols et sols calcimorphes
- Complexe lithosols, sols calcimorphes et sols hydromorphes
- Complexe lithosols, sols calcimorphes, vertisols et rouges méditerranéens
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et sols rouges méditerranéens
- Sols calcimorphes
- Sols faiblement ferrallitiques et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux
- Sols ferrugineux tropicaux – roches sableuses

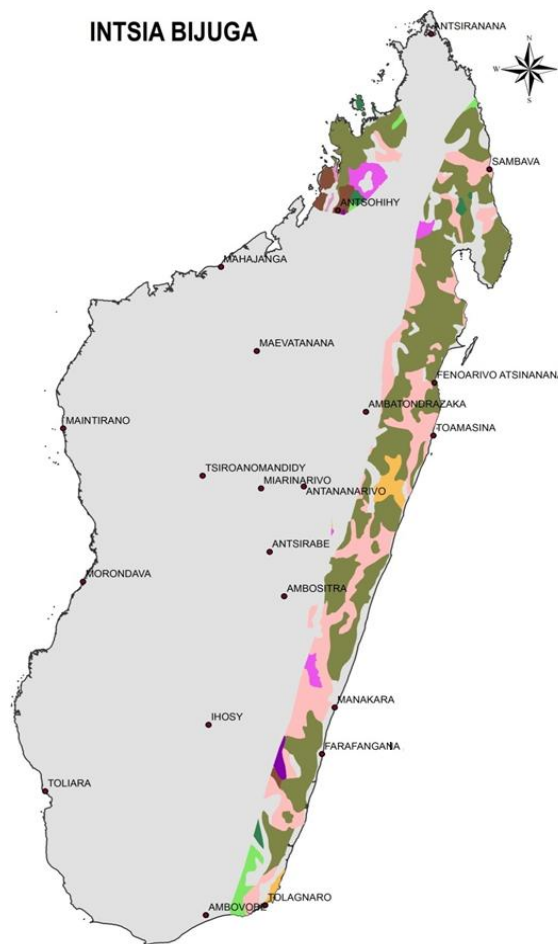
## HERITIERA LITTORALIS



### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge + sols peu évolués
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge
- Sols faiblement ferrallitique et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux
- Sols ferrugineux tropicaux – roches sableuses

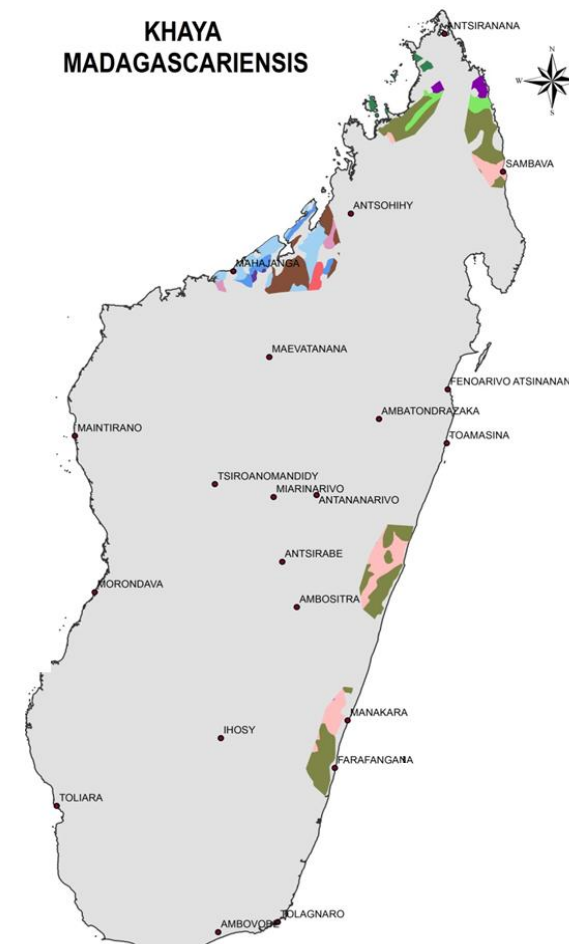
## INTSIA BIJUGA



### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge
- Complexe lithosols et sols calcimorphes
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Sols calcimorphes
- Sols faiblement ferrallitiques et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux

## KHAYA MADAGASCARIENSIS

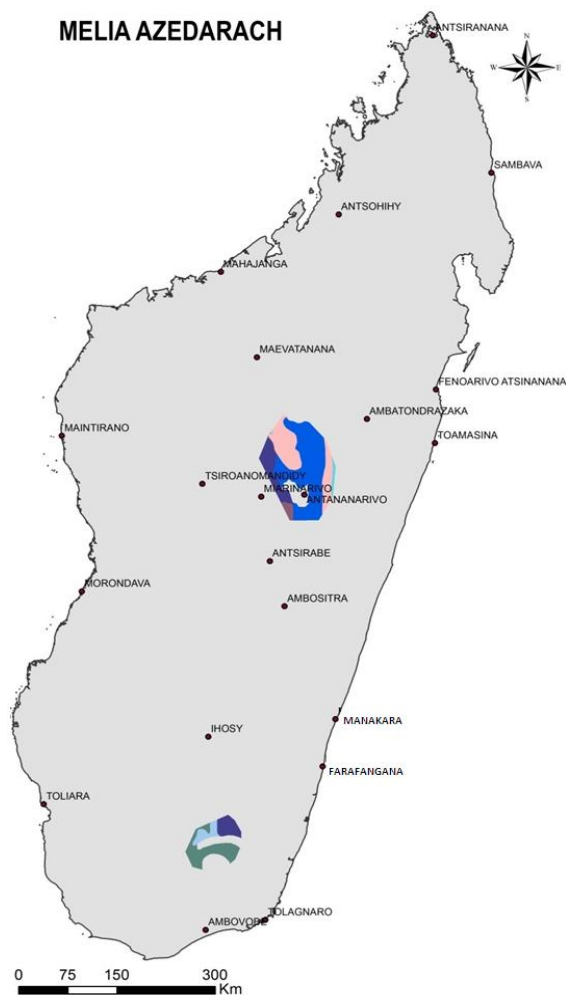


### LEGENDE

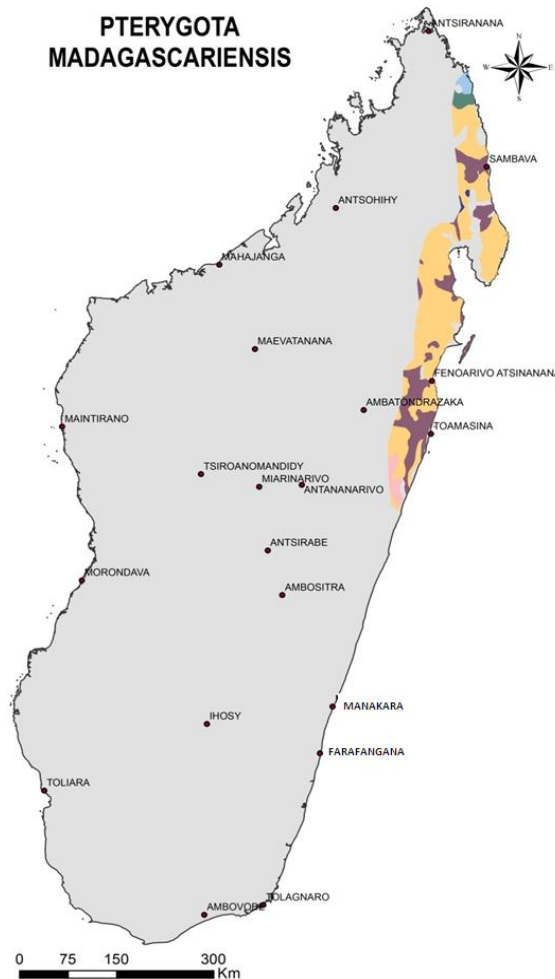
- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge
- Complexe lithosols et sols calcimorphes
- Complexe lithosols, sols calcimorphes et sols hydromorphes
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Sols faiblement ferrallitiques et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux
- Sols ferrugineux tropicaux – roches sableuses



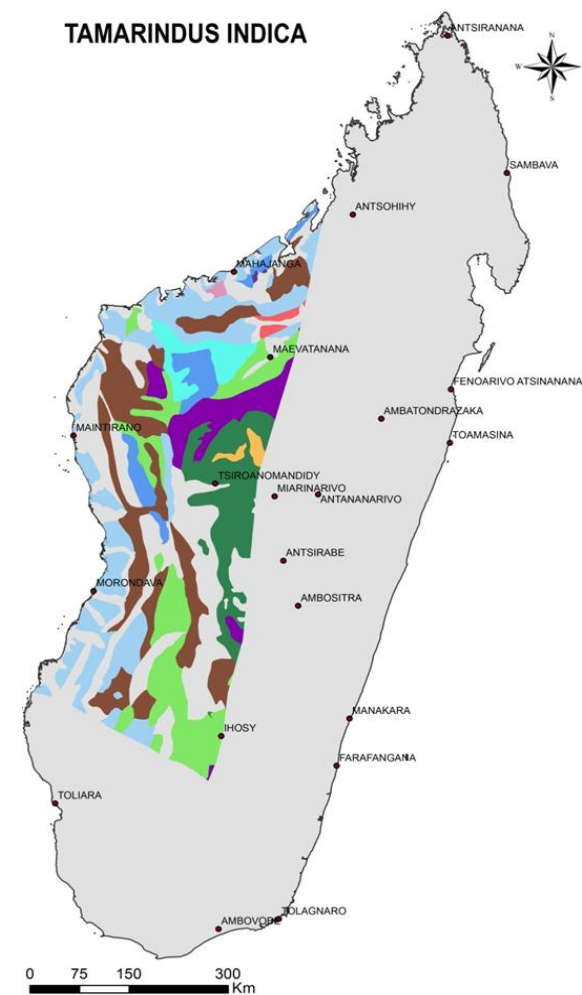
## MELIA AZEDARACH



## PTERYGOTA MADAGASCARIENSIS



## TAMARINDUS INDICA



### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge
- Sols faiblement ferrallitique et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux
- Sols ferrugineux tropicaux – roches sableuses

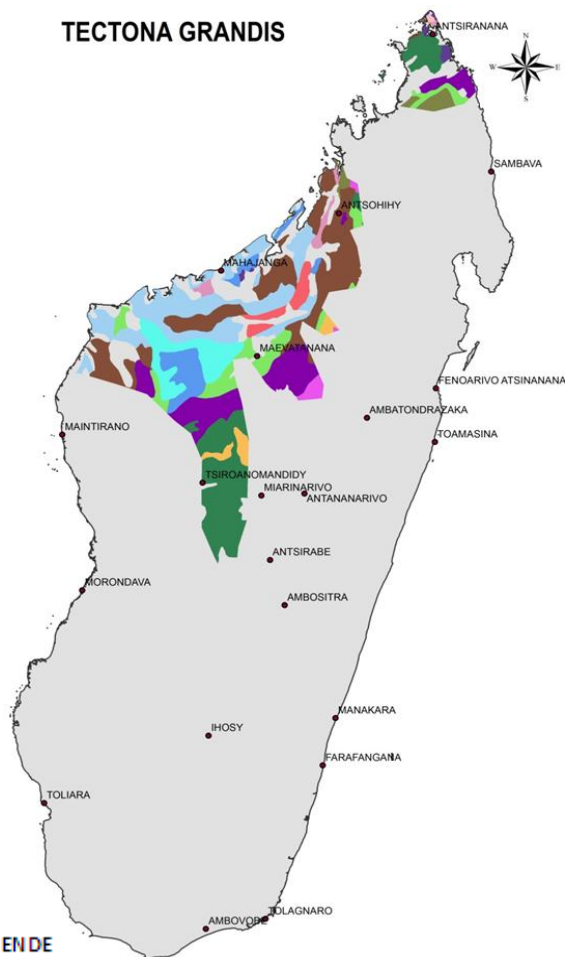
### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge + sols peu évolués
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Sols ferrallitiques jaune/rouge

### LEGENDE

- Complexe lithosols et sols calcimorphes
- Complexe lithosols, sols calcimorphes et sols hydromorphes
- Complexe lithosols, sols calcimorphes, vertisols et rouges méditerranéens
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Sols calcimorphes
- Sols faiblement ferrallitiques et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux
- Sols ferrugineux tropicaux – roches sableuses

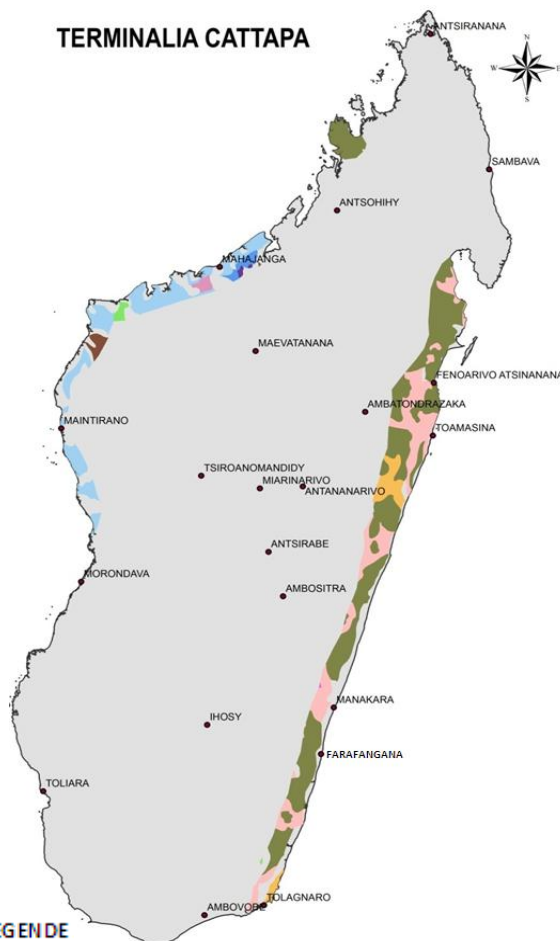
## TECTONA GRANDIS



### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge
- Complexe lithosols et sols calcimorphes
- Complexe lithosols, sols calcimorphes et sols hydromorphes
- Complexe lithosols, sols calcimorphes, vertisols et rouges méditerranéens
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et sols rouges méditerranéens
- Sols calcimorphes
- Sols faiblement ferrallitiques et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux
- Sols ferrugineux tropicaux – roches sableuses

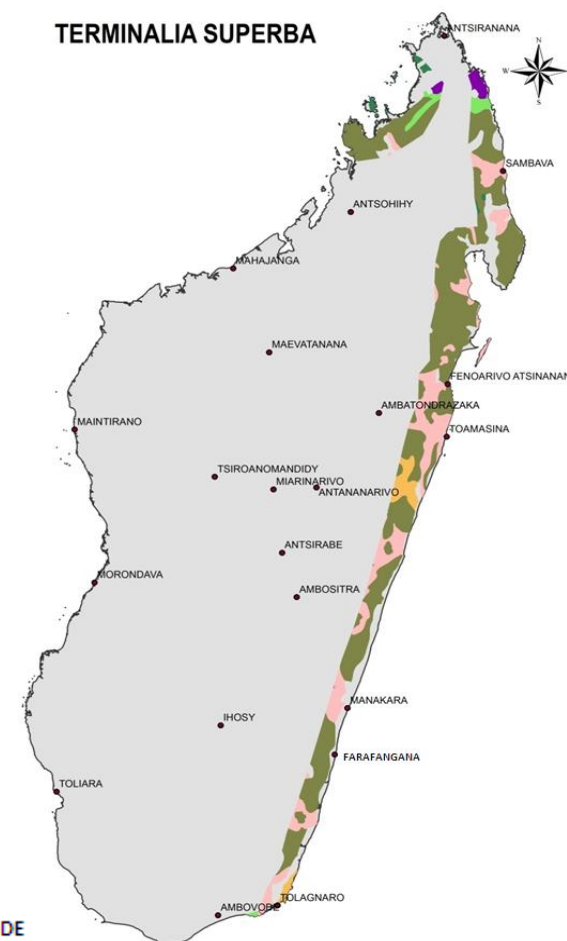
## TERMINALIA CATTAPA



### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge
- Complexe lithosols et sols calcimorphes
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et sols rouges méditerranéens
- Sols calcimorphes
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrugineux tropicaux
- Sols ferrugineux tropicaux – roches sableuses

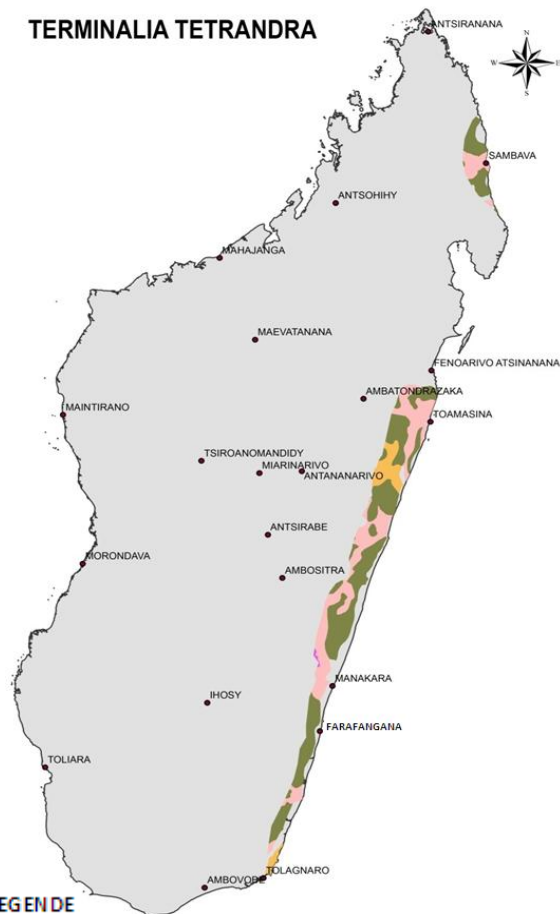
## TERMINALIA SUPERBA



### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et sols rouges méditerranéens
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges

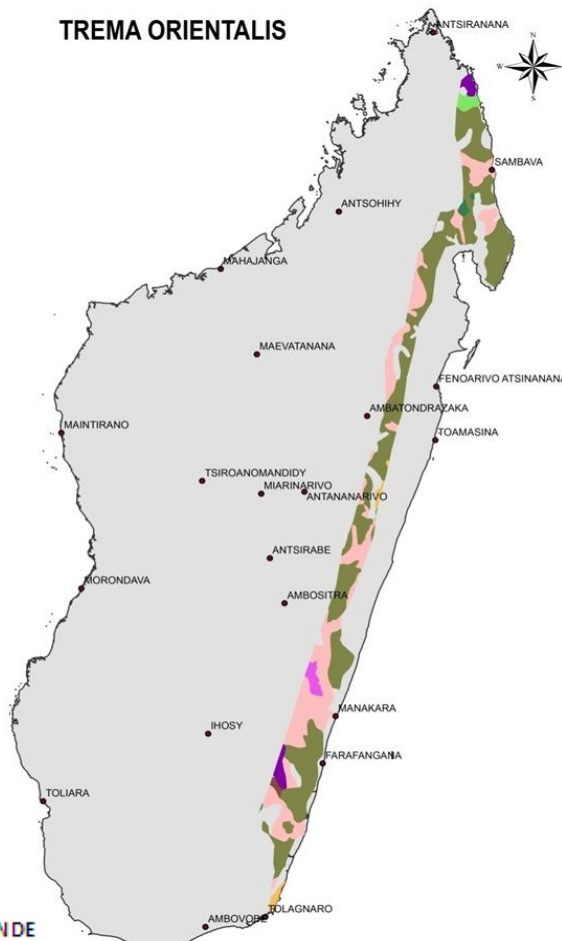
## TERMINALIA TETRANDRA



### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Sols faiblement ferrallitiques et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques

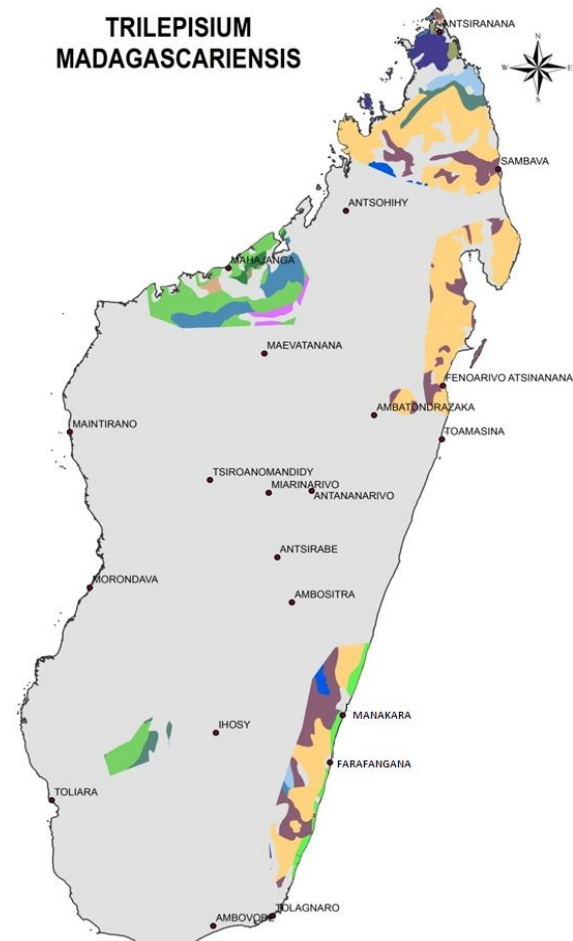
## TREMA ORIENTALIS



### LEGENDE

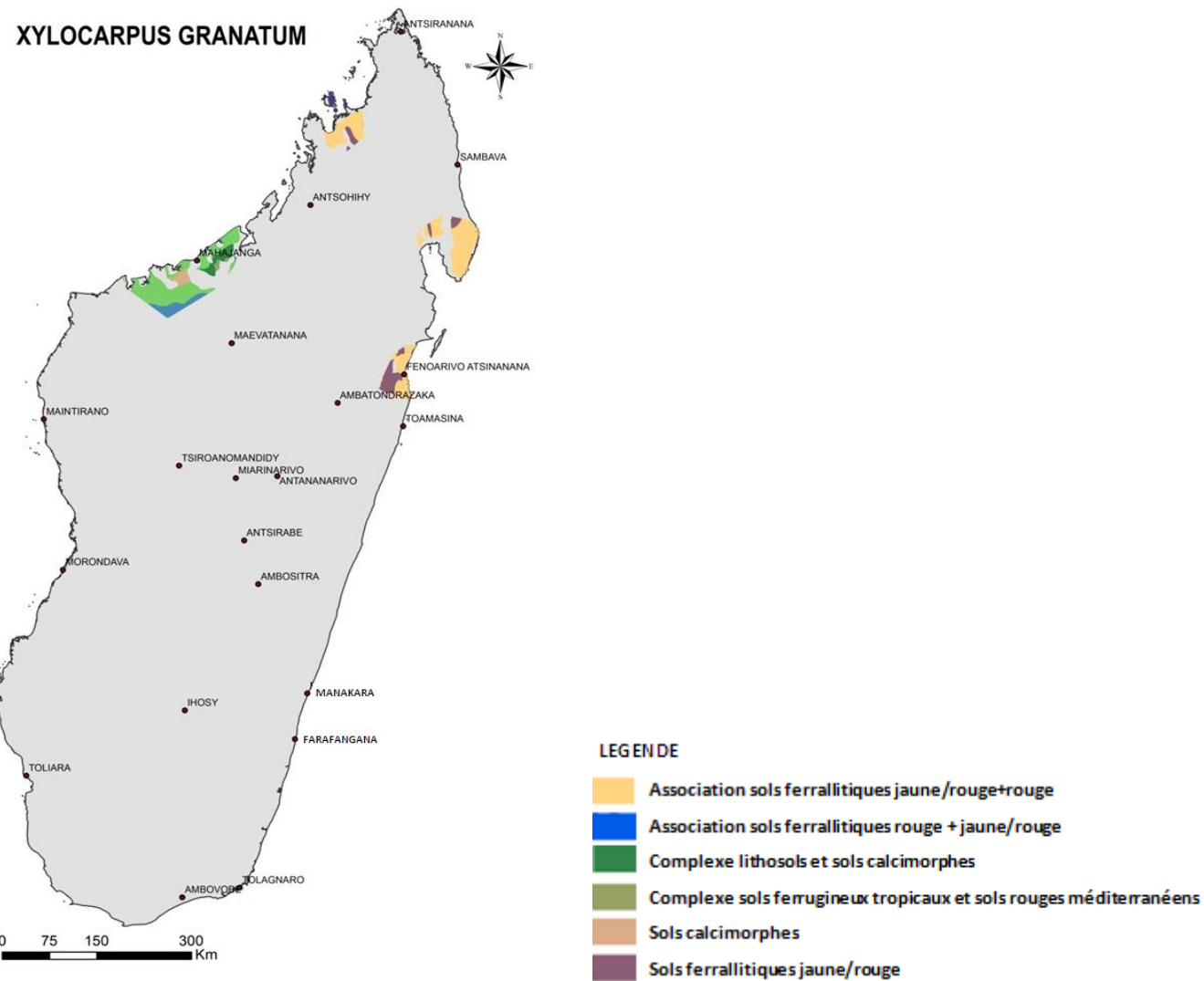
- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Sols faiblement ferrallitiques et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques jaune/rouge-Roches volcaniques
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux

## TRILEPISUM MADAGASCARIENSIS



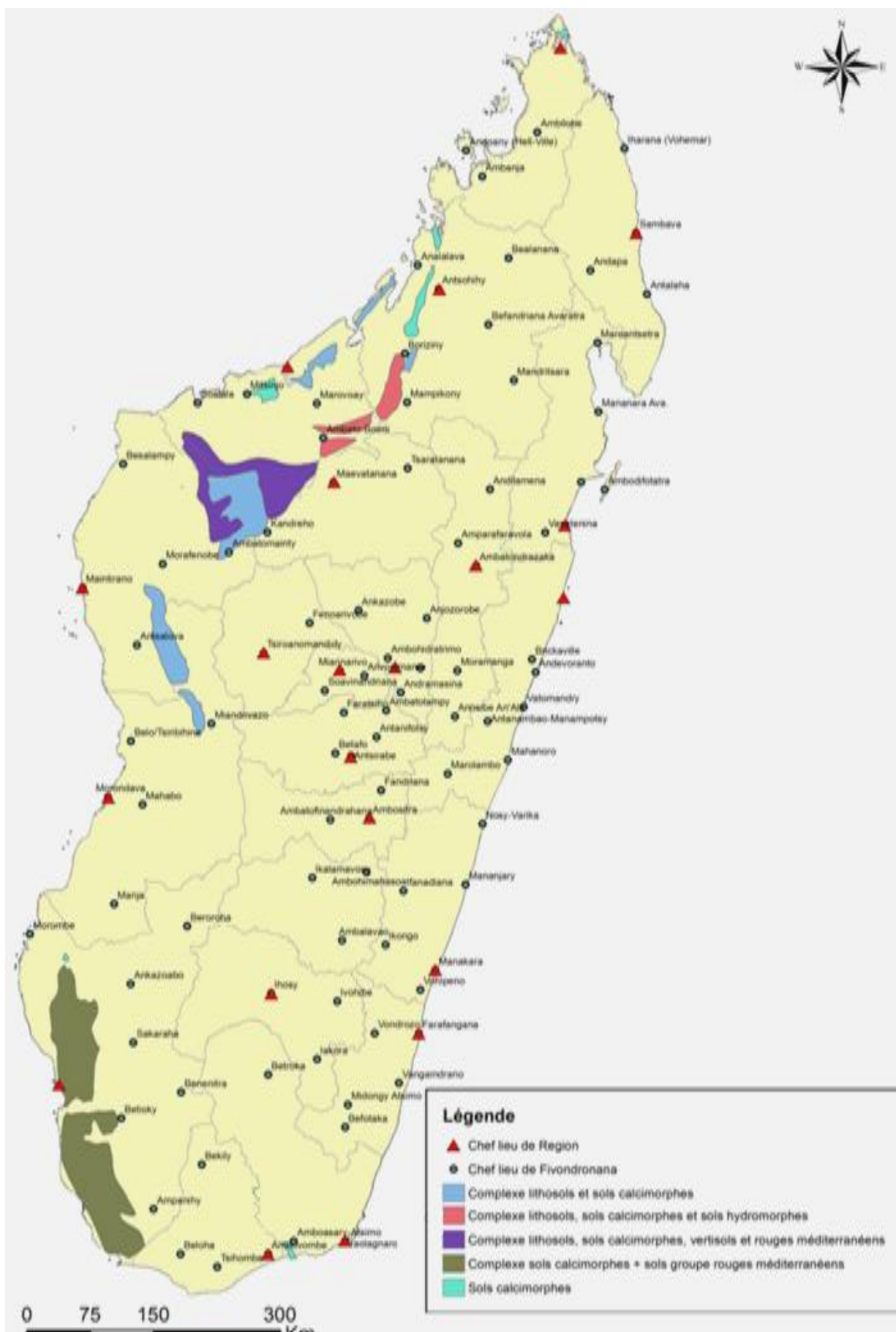
### LEGENDE

- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques jaune/rouge+rouge
- Association sols ferrallitiques rouge + jaune/rouge
- Complexe lithosols et sols calcimorphes
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et peu évolués
- Complexe sols ferrugineux tropicaux et sols rouges méditerranéens
- Sols calcimorphes
- Sols faiblement ferrallitique et ferrisols
- Sols ferrallitiques jaune/rouge
- Sols ferrallitiques rouges
- Sols ferrugineux tropicaux
- Sols ferrugineux tropicaux – roches sableuses





Annexe 2 : Carte de répartition des sols calcimorphes à Madagascar d'après la classification de Roederer et Bourgeat (1972)



Annexe 3 : Données climatiques des milieux d'étude

**1- PN Zombitse-Vohibasia et Station de reboisement de Sakaraha**

Tableau 1 : Données climatiques de Sakaraha (1961 – 1990)

	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin
<b>T moy (°C)</b>	17,8	19,3	22,2	25,1	26,3	26,5	26,8	26,5	25,6	23,5	20,4	17,8
<b>P (mm)</b>	6,9	8,2	8,8	41,7	78,9	201,1	197,6	102,1	96,4	30,1	17,2	10,3
<b>Nbre de j</b>	1,2	1,2	1,2	4,2	7,2	4,2	13,0	11,9	8,7	4,0	2,2	1,5

Source : Service météorologique Ampandrianomby, Antananarivo, 2009

In ANDRIAMISAINTSOA, 2010

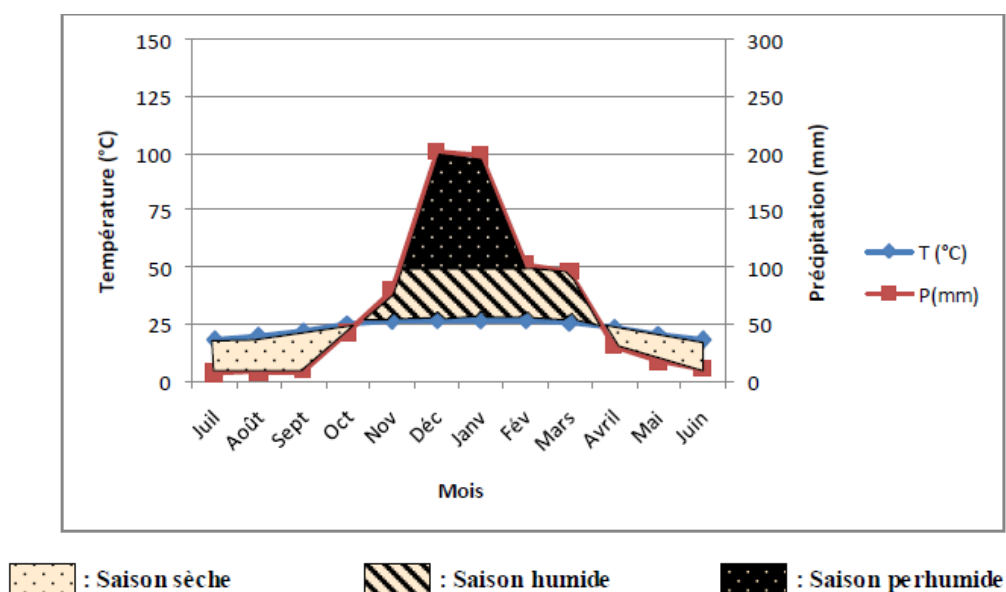


Figure 1 : Courbe ombrothermique de SAKARAHHA (1961 – 1990) selon Walter & Lieth

Source : ANDRIAMISAINTSOA, 2010

**2- Forêt de Kirindy-Morondava**

Tableau 2 : Données climatiques de Morondava (1961 – 1990)

	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin
<b>T moy (°C)</b>	21,5	22,2	23,7	25,4	26,6	27,4	27,6	27,5	27,4	26,2	23,7	21,7
<b>P (mm)</b>	2,3	2,2	2,6	11,9	20,6	183,3	241,6	200	89,5	16,8	11,4	2,4
<b>Nbre de j</b>	1	1	1	1	2	8	11	10	6	1	1	1

Source : Service météorologique Ampandrianomby, Antananarivo

In RAJOELINA, 2008



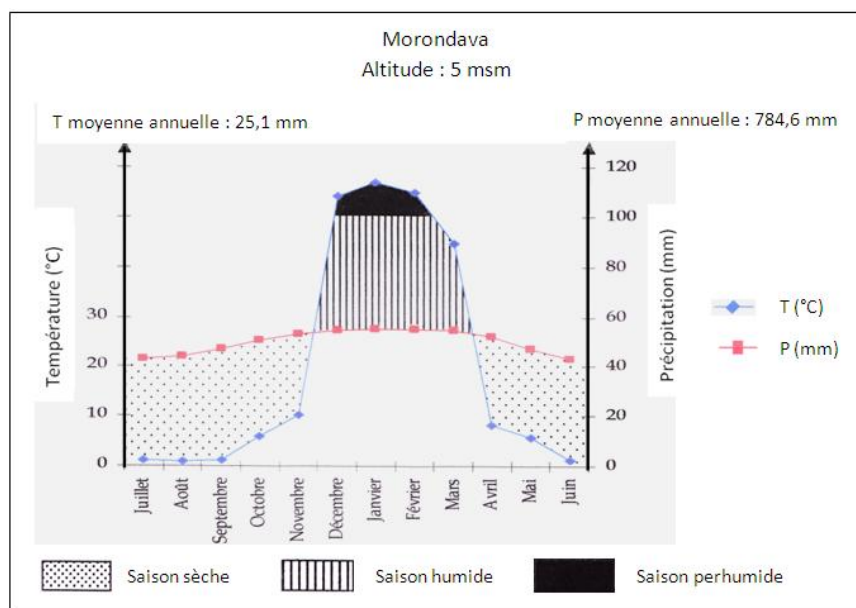


Figure 2 : Courbe ombrothermique de Morondava (1961 – 1990) selon Walter & Lieth

Source : RAJOELINA, 2008

Annexe 4 : Localisation géographique, caractéristiques climatiques et mode d'usage des terres au niveau des points de prélèvement

Zone d'étude	N° arbre	Coordonnées GPS (Degré Minute Seconde) (*)		Altitude (m) (*)	Précision GPS (m) (*)	P (mm)	T (°C)	Mode d'usage des terres (*)	Type de sol (*)
SAKARAH	<i>Acacia mangium</i>	S 22°54'12.5"	E 044°38'05.7"	635	5	735	22,8	Jardin de case	Sols ferrugineux rouges
	Vory 1	S 22°53'18.0"	E 044°42'04.8"	756	7	747	22,1	Forêt dense sèche	Sols ferrugineux lessivés à tendance podzolique
	Vory 2	S 22°53'05.6"	E 044°41'53.4"	784	7	748	22,0	Forêt dense sèche	Sols ferrugineux lessivés à tendance podzolique
	Katrafay 1	S 22°53'17.0"	E 044°41'30.5"	824	4	748	22,0	Forêt dense sèche	Sols ferrugineux lessivés à tendance podzolique
	Katrafay 2	S 22°53'18.4"	E 044°41'28.8"	819	5	748	22,0	Forêt dense sèche	Sols ferrugineux lessivés à tendance podzolique
	Nonoka 1	S 22°53'21.6"	E 044°41'26.1"	815	5	744	22,3	Forêt dense sèche	Sols ferrugineux lessivés à tendance podzolique
	Nonoka 2	S 22°53'45.1"	E 044°37'11.3"	602	5	733	22,9	Savane arborée	Sols ferrugineux jaunes rouges
	Nonoka 3	S 22°53'53.7"	E 044°36'27.0"	619	4	732	22,8	Savane arborée	Sols ferrugineux jaunes rouges
	Mandresy 1	S 22°53'16.3"	E 044°41'07.2"	793	5	747	21,9	Lisière de FDS	Sols ferrugineux lessivés à tendance podzolique
	Mandresy 2	S 22°53'14.8"	E 044°41'10.3"	802	5	747	21,9	Lisière de FDS	Sols ferrugineux lessivés à tendance podzolique
	Mandresy 3	S 22°53'51.4"	E 044°36'26.4"	622	5	732	22,8	Savane arborée	Sols ferrugineux rouges
	Adabo 1	S 22°53'39.3"	E 044°36'51.5"	607	4	733	22,9	Savane arborée	Sol ferrugineux lessivés
	Adabo 2	S 22°53'39.3"	E 044°36'51.3"	606	4	733	22,9	Savane arborée	Sol ferrugineux lessivés
	Adabo 3	S 22°54'07.6"	E 044°36'24.7"	629	5	732	22,8	Savane arborée	Sol ferrugineux jaune-rouge
	Filao 1	S 22°54'37.3"	E 044°31'05.5"	466	5	721	23,4	Forêt artificielle	Sol ferrugineux lessivés
	Filao 2	S 22°54'37.3"	E 044°31'05.3"	466	5	721	23,4	Forêt artificielle	Sol ferrugineux lessivés
	Filao 3	S 22°54'37.3"	E 044°31'04.8"	466	5	721	23,4	Forêt artificielle	Sol ferrugineux lessivés
MORONDAVA	Adabo 1	-	-					Savane arborée	Sol hydromorphe à caractère vertique
	Vory 1	S 22°04'12.5"	E 044°39'30.5"	54	5	766	24,6	Forêt dense sèche	Sol ferrugineux lessivé enrichi en argile
	Fiamy 1	S 22°04'07.2"	E 044°39'46.3"	46	5	767	24,6	Forêt dense sèche	Sol ferrugineux jaune-rouge
	Fiamy 2	S 20°04'30.2"	E 044°39'11.3"	51	5	918	26,0	Forêt dense sèche	Sol ferrugineux lessivé
	Kily 1	S 20°04'22.6"	E 044°39'37.5"	50	4	920	26,0	Forêt dense sèche	Sol ferrugineux lessivé
	Kily 2	S 20°04'23.0"	E 044°39'37.8"	56	4	920	26,0	Forêt dense sèche	Sol ferrugineux lessivé
	Kily 3	S 20°04'22.9"	E 044°39'37.6"	54	4	920	26,0	Forêt dense sèche	Sol ferrugineux lessivé
	Akao 1	S 22°04'46.9"	E 044°28'34.6"	9	4	758	25,1	Forêt artificielle	Sol hydromorphe
	Akao 2	S 22°04'43.6"	E 044°28'37.2"	9	4	758	25,1	Forêt artificielle	Sol hydromorphe
	Akao 3	S 22°04'42.7"	E 044°28'37.2"	8	5	758	25,1	Forêt artificielle	Sol hydromorphe
	Kapoaka 1	S 19°58'36.6"	E 044°36'09.1"	35	5	919	26,1	Savane arborée	Sol ferrugineux lessivés
	Kapoaka 2	S 19°58'36.0"	E 044°36'09.1"	36	4	919	26,1	Jardin de case	Sol ferrugineux rouge
	Kapoaka 3	S 19°58'35.5"	E 044°36'09.1"	35	5	919	26,1	Jardin de case	Sol ferrugineux rouge
	Gonda 1	S 19°58'32.5"	E 044°35'20.0"	28	4	914	26,0	Savane arborée	Sol ferrugineux lessivé
	Gonda 2	S 19°58'33.2"	E 044°35'19.8"	27	5	914	26,0	Savane arborée	Sol ferrugineux lessivé
	Adabo 2	S 19°58'32.1"	E 044°35'21.2"	26	5	914	26,0	Savane arborée	Sol hydromorphe à caractère vertique
	Mandresy 1	S 20°08'00.3"	E 044°32'53.7"	28	5	863	25,8	Jardin de case	Sol ferrugineux jaune-rouge

Source : BD 500 FTM et auteur (\*)

## Annexe 5 : Fiche d'observation de profils pédologiques

Commune:

Code Site:

Coordonnées. Géographiques:

Altitude:

### Précision GPS:

Date:

Végétation:

[illegible]

## 1. OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION

Ce mode opératoire décrit la méthode mise en œuvre au LRI pour déterminer la teneur en carbonate d'un échantillon de sol exprimée en  $\text{CaCO}_3$ .

Cette méthode s'applique à tous les types de sols, mais peut rencontrer des difficultés dans le cas de :

- Sols dégageant d'autres composés gazeux que le  $\text{CO}_2$  dans les conditions de l'essai ;
- Sols dolomitiques, contenant des quantités appréciables de  $\text{MgCO}_3$  et pour lesquels l'expression de la teneur en carbonate sous forme de  $\text{CaCO}_3$  n'est pas adaptée.

Les échantillons sont au préalable séchés, tamisés à 2mm et broyés à 200  $\mu\text{m}$

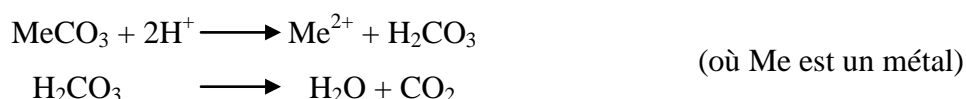
## 2. TERME DE REFERENCE

Norme internationale NF ISO 10693 (Qualité du sol)

*Détermination de la teneur en carbonate-Méthode volumétrique*

## 3. PRINCIPE

L'acide chlorhydrique est ajouté à un échantillon de sol pour décomposer tous les carbonates (mono- et bicarbonates) présents. La réaction sous forme simplifiée s'écrit :



Le volume de gaz carbonique dégagé est mesuré à l'aide d'un appareil de Bernard et est comparé au volume de  $\text{CO}_2$  produit par du carbonate de calcium pur dans les mêmes conditions de température et de pression.

Conventionnellement, la teneur en carbonate est exprimée par la teneur équivalente en carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ .

## 4. MATERIELS

- Balance analytique précision  $1/10^{\text{ème}}$  de rang
- Erlen de 100ml à col en verre (toute la série identique)
- Tube en matière plastique (cuve spectro), pouvant être introduit dans un flacon à réaction
- Distributeur de réactif, réglé à 10 ml
- Calcimètre Bernard (colonne 100 ml, ampoule-réservoir, bouchon + robinet à 3 voies)

Entretien : En cas de formation d'algues dans le tube, remplir celui-ci avec la quantité nécessaire d'eau de javel. Laisser agir suffisamment, puis rincer plusieurs fois à l'eau. Graisser les robinets si nécessaire.

## 5. PRODUITS CHIMIQUES ET REACTIFS

- Solution saturée de  $\text{NaCl}$  : 250 ml pour remplissage de la colonne (66g / 250 ml)
- Acide chlorhydrique dilué au 1/3, préparé par dilution volumétrique dans l'eau bidistillée d' $\text{HCl}$  concentré technique : SOUS HOTTE, dans 60 ml d'eau, verser en agitant 30 ml  $\text{HCl}$ .
- Carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  pur, en poudre (MERCK, ref. 2060) séché à 105°C (Etalon)

## 6. MODE OPERATOIRE

Pesées :

- Etalons (3 répétitions) :  $0,300 \text{ g} \pm 0,005 \text{ g}$  de  $\text{CaCO}_3$  séché à  $105^\circ\text{C}$
- Sol de référence et échantillons : environ  $2 \text{ g} \pm 0,010$  pour le 1<sup>er</sup> essai

Remplissage de l'appareillage

- Remplir l'ampoule-réservoir avec la solution aqueuse saturée en  $\text{NaCl}$  (robinet 3 voies reliant la colonne avec l'extérieur)
- Ajouter la hauteur de l'ampoule pour réglage du liquide à zéro

Mesure des étalons et échantillons

- Tourner le robinet 3 voies pour connecter le côté aérien à l'extérieur
- Remplir le tube réactif (cuve spectro plastique macro) aux  $2/3$  environ avec  $\text{HCl } 1/3$

**Attention : durant les opérations suivantes, tenir l'aérien par le goulot, du bout des doigts ; jamais à pleine main, ce qui modifierait sa température !**

- Introduire le tube réactif dans l'aérien contenant le  $\text{CaCO}_3$  étalonnage sans le renverser
- Enfoncer le bouchon caoutchouc sur l'ermen
- tourner le robinet 3 voies pour connecter le côté erlen à x
- incliner l'ermen pour renverser l'acide sur la prise d'essai, puis agiter légèrement
- poser l'ermen sur le socle de l'appareil et laisser stabiliser 2 minutes
- placer un thermomètre à proximité du calcimètre et noter la température ambiante (le réservoir du thermomètre ne touchant ni la paillasse ni l'appareil)
- en réglant la hauteur de l'ampoule-réservoir, amener le liquide à même hauteur dans l'ampoule et la colonne de mesure
- noter alors le volume de gaz produit à pression atmosphérique

**Dans les conditions ambiantes habituelles, le volume produit par  $0,300 \text{ g}$  de  $\text{CaCO}_3$  doit être compris entre 65 et 76 ml ; si le chiffre est en dehors de ces valeurs, recommencer l'essai.**

- opérer de la même façon avec les échantillons à mesurer
- si le volume mesuré est inférieur à 2 ml, recommencer avec une prise d'essai plus importante, en mouillant la prise d'essai avec un peu d'eau distillée.
- Oter alors le volume de gaz produit à pression atmosphérique

## 7. CALCUL

Titre en  $\text{CaCO}_3$  de l'appareillage

$$T_{\text{app}} = PE_{\text{étalon}} (\text{g}) \times 100 / CO_2 \text{ étalonnage (ml)} \text{ (on utilisera la moyenne des 3 répétitions)}$$

Titre en  $\text{CaCO}_3$  de l'échantillon appareillage :

$$\text{CaCO}_3 \% = CO_{2\text{échantillon}} (\text{ml}) \times T_{\text{app}} / PE_{\text{sol}} (\text{g})$$

## **1. Espèces présentant le potentiel d'oxalate de calcium**

### **a) *Broussonetia greveana***

*Broussonetia greveana* Baill. (MORACEAE) est un arbre de taille moyenne, à latex blanc, qui ne se rencontre qu'à Madagascar et à Mayotte. Généralement caducifolié, cet arbre peut être sempervirent. L'arbre peut atteindre 25 m de hauteur et 80 cm voire 150 cm de diamètre. Sa croissance est toutefois lente. Une hauteur de 4 à 6 m n'est atteinte qu'à 7 ans. L'arbre présente un fût droit dépourvu de branche sur 12 m de hauteur, une cime étalée ainsi que des feuilles alternes, simples et pennatinervé de grande taille (2–20 cm x 0,5–8 cm) (LOUPPE, 2008).

A Madagascar, *B. greveana* est présent dans tous les types de forêts de l'ouest de l'île jusqu'à 800 m d'altitude (LOUPPE, 2008). L'essence se rencontre sur sol sableux ou argilo-sableux avec un bon drainage (RAJOELISON et *al.*, 1993). A Mayotte, il pousse dans tout type de forêt, du type humide au type sec. Cette répartition assez étendue est due en partie à son adaptabilité face aux exigences climatiques et édaphiques.

### **b) *Ficus spp***

#### **➤ *Ficus marmorata***

*Ficus marmorata* Baker (1883) est un hémiepiphyte qui peut se présenter sous la forme d'un arbre d'environ 15 m de hauteur. Ses feuilles glabres et de petite taille (2-8 cm x 1.2-4.5 cm) sont caduques. *F. marmorata* est endémique de Madagascar. L'espèce est localisée dans le sud et le sud-ouest de l'île. Elle pousse dans les forêts de basse altitude jusqu'à 300 m (RASPLUS, 2002).

#### **➤ *Ficus polita***

*Ficus polita* Vahl (MORACEAE) est un hémiepiphyte qui peut aussi se présenter sous la forme d'un arbre de petite taille (15m de hauteur) et fortement branchu (Cf photo 6). Cette espèce se reconnaît par son feuillage brillant. Ses feuilles ovales à tendance elliptiques sont glabres, de taille moyenne (5-24 cm x 3,5-15 cm) et caduques (RASPLUS, 2002). Le système racinaire est particulièrement étendu.

*F. polita* se localise dans les forêts denses humides sempervirentes et les forêts galerie d'Afrique occidentale et centrale ainsi que dans les forêts littorales d'Afrique orientale et australe. Elle est largement distribuée à Madagascar, en particulier dans l'Est et le Nord, jusqu'à 700 m d'altitude (RASPLUS, 2002).

#### **➤ *Ficus sycomorus***

*Ficus sycomorus* Linné (MORACEAE) est un arbre semi-décidue atteignant généralement 18 à 22 m voire 45 m de hauteur. L'écorce des tiges âgées est assez lisse et de couleur gris-vert. Les feuilles largement ovales ou elliptiques sont de taille moyenne (2,5- 21 cm x 2-16 cm) (ICRAF, 2002). *Ficus sycomorus* se rencontre fréquemment le long des cours d'eau mais elle est aussi commune dans les savanes arborées où elle constitue un indicateur de la présence de nappe phréatique peu profonde



(ICRAF, 2002). Elle pousse normalement sur des sols argileux riches en nutriments mais peuvent être observée sur des sols sableux (ICRAF, 2002). La distribution malgache de *F. sycomorus* est mal connue, mais elle pourrait être répandue à Madagascar jusqu'à 1250 m d'altitude (RASPLUS, 2002).

➤ ***Ficus sp***

Cette espèce de *Ficus* est restée indéterminée. Il semble cependant que ce soit également un hémipiphyte qui finit par avoir la forme d'un arbre autonome de grande taille.

**c) *Casuarina spp***

Les *Casuarina* sont des arbres de la famille des CASUARINACEAE. Ce sont des espèces héliophiles du type pionnier dont le fût peut atteindre 20 m de hauteur. Le tronc est étroit. Il est couvert par une écorce grise présentant des gerçures (ONF, 2010). Les feuilles, du type aiguille, s'articulent en verticille au niveau des ramules et donnent à l'arbre un aspect semblable à celui du pin (*Pinus sp*). Chez certaines espèces, les petites branches s'élagent de façon naturelle (CTFT, 1961).

Les *Casuarina* sont des essences très résistantes qui s'adaptent à des terrains difficiles (ONF, 2010). Aussi, elles sont utilisées pour la réhabilitation des sols dégradés. Cette propriété est due à leur capacité à développer une association symbiotique avec des bactéries fixatrices d'azote atmosphérique qui permettent d'enrichir le sol.

*Casuarina equisetifolia* et *Casuarina cunninghamiana* sont les deux (2) espèces de filao qui existent à Madagascar. *Casuarina equisetifolia* est une espèce autochtone qui se rencontre sur la côte Est, Ouest et Sud de l'île. *Casuarina cunninghamiana* est une espèce introduite. Elle est plus apparentée aux hautes-terres (CHAUVET, 1965).

➤ ***Casuarina cunninghamiana***

*C. cunninghamiana* est un arbre à port érigé (CTFT, 1961). Il peut atteindre 15-20 m de hauteur, voire plus, à 30-40 ans. Son fût peut être parfaitement droit. Mais pour cela, il demande des soins et un sol riche (CHAUVET, 1965).

➤ ***Casuarina equisetifolia***

*C. equisetifolia* est un grand arbre sempervirent qui peut atteindre une trentaine de mètre de haut (CTFT, 1961). Le fût, assez droit, peut avoir un  $d_{1,30}$  de 60 cm voire 100 cm (RAJOELISON et *al.*, 1993). L'arbre est à port relativement pleureur et a tendance à faire des fourches. L'écorce, lisse et de teinte claire, devient rugueuse et brune à mesure que l'arbre vieillit. Elle s'exfolie en bandes longitudinales (CTFT, 1961). La durée de vie de l'espèce est d'environ 50-60 ans (CHAUVET, 1965).

*C. equisetifolia* se rencontre sur sols profonds à texture sableuse. Elle supporte des périodes d'eau stagnante et tolère bien les sols salins, les sols pauvres et les sols calcaires (RAJOELISON et *al.*, 1993). Cette essence est capable de s'adapter dans des régions à climat perhumide comme dans celles à climat sec de mousson où la saison sèche dure 6 à 7 mois. Toutefois, dans les régions semi-arides, la brise de mer et le contact avec l'eau souterraine lui sont nécessaires en saison sèche pour combler le déficit d'humidité (CTFT, 1961).

**d) *Tamarindus indica***

*T. indica* (FABACEAE Sous-famille CESALPINIACEAE) est un grand arbre originaire de Madagascar et d'Afrique orientale. L'arbre se distingue par son tronc court et sa grande cime étalée. Il peut mesurer jusqu'à 25 à 100 cm de  $d_{1,30}$  et 20 à 30 m de hauteur. L'écorce grisâtre est écailleuse et présente des crevasses longitudinales. Les feuilles sont alternes et paripennées. Généralement sempervirente, l'arbre peut être caduc dans les zones semi-arides (RAJOELISON et *al.*, 1993). Le système racinaire est étendu (BOUROU, 2012). Cette essence héliophile de type nomade est bien adaptée dans toute la partie occidentale de l'île jusqu'à 500 m d'altitude. Elle préfère les sols profonds et perméables, de texture sablo-argileuse à sableuse voire graveleuse (RAJOELISON et *al.*, 1993).

**e) *Ceiba pentandra***

*Ceiba pentandra* (BOMBACACEAE) (APG : MALVACEAE) est un arbre de très grande taille qui fournit une fibre appelée kapok. L'arbre peut atteindre 60 m de haut. Le fût droit atteint 200 à 240 cm de diamètre et présente un large contrefort à sa base. Les feuilles sont alternes, composées, digitées et caduques. Les racines s'étalent horizontalement dans le sol sur une profondeur de 40-80 cm (LOUPPE et *al.*, 2008).

Cette espèce robuste et rustique est adaptée à un climat à saison sèche bien marquée (MONTAGNAC, 1960). Mais elle peut être cultivée dans toutes régions tropicales (LOUPPE et *al.*, 2008).

**f) *Cordia myxa***

*Cordia myxa* (BORAGINACEAE) est un arbuste atteignant 12 m de haut. Son fût sinueux ou droit est couvert par une écorce grise et craquelée. Les feuilles sont alternes, simples et de forme ovale à orbiculaire. Elles sont de grande taille (3–18 cm × 3–20 cm).

*Cordia myxa* a une croissance assez rapide. Elle est présente dans les forêts claires sèches décidues des pays tropicaux, principalement sur sol alluvial, jusqu'à 1500 m d'altitude. Il tolère un ombrage modéré et subsiste à la sécheresse et au gel (OUDHIA, 2007).

**2. Espèces ne présentant pas le potentiel d'oxalate de calcium**

**a) *Acacia mangium***

*Acacia mangium* Willd. (FABACEAE S.f. MIMOSOÏDEAE) est un arbre sempervirent à croissance rapide. Mis dans des conditions favorables à son développement, il peut atteindre 30 m de hauteur et peut avoir jusqu'à 60 cm de diamètre (RAJOELISON et *al.*, 1993). Le fût est droit. Les feuilles sont des phyllodes de grande taille (L : 11 - 27 cm ; l : 3 -10 cm) présentant des nervures longitudinales (GNAHOUA et LOUPPE, 2003). Le système racinaire est vigoureux et traçant.

*Acacia mangium* pousse normalement dans les forêts claires et les savanes boisées des pays tropicaux à climat chaud et humide mais elle supporte des conditions climatiques diverses. Cette espèce pionnière, exigeante en lumière, se développe généralement sur des sols acides (pH 4.5-6.5), pauvres et bien drainants en surface. *Acacia mangium* est une plante fixatrice d'azote atmosphérique

qui peut être utilisée pour améliorer le sol (RAJOELISON et *al.*, 1993). Elle est en effet capable de développer des associations symbiotiques vivant dans ses racines dont des rhizobiums et endomycorhizes (MACKEY, 1996).

**b) *Cedrelopsis grevei***

*Cedrelopsis grevei* Baill (RUTACEAE) est un arbre forestier caducifolié, endémique de l'ouest et du sud de Madagascar. L'arbre est de taille moyenne mais il peut atteindre 28 m de hauteur et 60 à 120 cm de diamètre. Sa croissance est très lente. Il n'atteint 0,5–3 m de hauteur qu'à l'âge de 7 ans. Il présente un fût droit dépourvu de branches jusqu'à 9 m de hauteur et des feuilles alternes composées paripennées de 12 à 20 cm de long (DONGOCK NGUEMO, 2008).

*C. grevei* se rencontre dans les savanes boisées, les terrains broussailleux, la forêt secondaire et la forêt périodiquement sèche jusqu'à une altitude de 500 - 900 m. Il pousse souvent sur des sols sablonneux rouges ou jaunes mais s'adapte à différents types de sol (DONGOCK NGUEMO, 2008).

Annexe 8 : pH eau des sols prélevés au niveau des espèces oxalogènes dans la zone d'étude

Milieu d'étude	Arbre N°	pH eau au pied		pH eau à 5 m	
		h <sub>0-10</sub>	h <sub>10-20</sub>	h <sub>0-10</sub>	h <sub>10-20</sub>
SAKARAH	<i>Acacia mangium</i>	5,5	5,5	5,5	5,5
	<i>Broussonetia greveana</i> 1	5,5	5,5	5,5	5,5
	<i>Broussonetia greveana</i> 2	5,5	5,5	5,5	5,5
	<i>Cedrelopsis grevei</i> 1	5,5	5,5	5,5	5,5
	<i>Cedrelopsis grevei</i> 2	5,5	5,5	5,5	5,5
	<i>Ficus marmorata</i> 1	5,5	5,5	5,5	5,5
	<i>Ficus marmorata</i> 2	5,5	5,5	5	5
	<i>Ficus marmorata</i> 3	5,5	5,5	5	5
	<i>Ficus polita</i> 1	6,5	6,5	5,5	5
	<i>Ficus polita</i> 2	6	6	5,5	5
	<i>Ficus polita</i> 3	5,5	5,5	5	5,5
	<i>Ficus sycomorus</i> 1	6,5	7	5,5	5,5
	<i>Ficus sycomorus</i> 2	5,5	6	5,5	5,5
	<i>Ficus sycomorus</i> 3	6,5	5,5	5,5	5,5
	<i>Casuarina cunninghamiana</i> 1	7	6	6	6
	<i>Casuarina cunninghamiana</i> 2	6	6	6	6
	<i>Casuarina cunninghamiana</i> 3	6,5	5,5	5,5	5,5
MORONDAVA	<i>Ficus sycomorus</i> 1	-	-	5,5	5,5
	<i>Ficus sycomorus</i> 2	6	5	5,5	6
	<i>Broussonetia greveana</i> 1	6,5	5,5	6	5,5
	<i>Ficus sp</i> 1	6,5	5,5	5,5	5
	<i>Ficus sp</i> 2	5,5	-	5,5	-
	<i>Ficus polita</i> 1	6,5	5,5	5,5	5,5
	<i>Tamarindus indica</i> 1	7,5	6	6	5,5
	<i>Tamarindus indica</i> 2	7	6,5	6	5,5
	<i>Tamarindus indica</i> 3	6,5	5,5	5,5	5,5
	<i>Casuarina equisetifolia</i> 1	5,5	6,5	5	5,5
	<i>Casuarina equisetifolia</i> 2	6,5	5,5	6	5,5
	<i>Casuarina equisetifolia</i> 3	6,5	5,5	5,5	5
	<i>Ceiba pentandra</i> 1	7	6,5	6	5,5
	<i>Ceiba pentandra</i> 2	8	7,5	5,5	5,5
	<i>Ceiba pentandra</i> 3	7	-	6	6
	<i>Cordia myxa</i> 1	6	5,5	5,5	5
	<i>Cordia myxa</i> 2	-	5,5	5	5

Note :

- : indéterminé

■ : espèces ayant présenté de l'effervescence au sol

Annexe 9 : Listes floristiques des espèces inventoriées dans la zone d'étude

➤ Liste floristique (Sakaraha)

N°	Noms vernaculaires	Noms scientifiques	Famille
1	-	<i>Acacia mangium</i>	FABACEAE / MIMOSOIDAE
2	Adabo	<i>Ficus sycomorus</i>	MORACEAE
3	Ampoly lahy	<i>Vepris sp</i>	RUTACEAE
4	Ampoly vavy	<i>Vepris sp</i>	RUTACEAE
5	Banaky	<i>Bauhinia sp</i>	FABACEAE/ CESALPINIACEAE
6	Belelo	<i>Grewia glandulosa</i>	MALVACEAE/ TILIACEAE
7	Dagoa	<i>Strychnos madagascariensis</i>	LOGANIACEAE
8	Daronamboa	<i>Commiphora simplicifolia</i>	BURSERACEAE
9	Faliandro	NI 1	NI 1
10	Famata	<i>Euphorbia sp</i>	EUPHORBIACEAE
11	Fanazava	<i>Turraea sericea</i>	MELIACEAE
12	Fantsikakoholahy	<i>Barleria sp</i>	ACANTHACEAE
13	Filao	<i>Casuarina cunninghamiana</i>	CASUARINACEAE
14	Firavoanarivo	NI 2	NI 2
15	Forofoky	<i>Securinea perrieri</i>	PHYLLANTHACEAE
16	Fotsy avaliky	<i>Chadsia greveii</i>	FABACEAE/ PAPILIONACEAE
17	Hazokataky	<i>Bussea perrieri</i>	FABACEAE/ CESALPINIACEAE
18	Hazombalala	<i>Croton mahafaliensis</i>	EUPHORBIACEAE
19	Hazomby	<i>Strychnos decussata</i>	LOGANIACEAE
20	Kafenala	<i>Coffea sp</i>	RUBIACEAE
21	Katrafay	<i>Cedrelopsis greveii</i>	RUTACEAE
22	Kindroa	NI 3	NI 3
23	Kiritrala	NI 4	NI 4
24	Kitata	<i>Bridelia pervilleana</i>	PHYLLANTHACEAE
25	Lalipito	<i>Homalium albiflorum</i>	SALICACEAE
26	Lambina	<i>Baudouinia fluggeiformis</i>	FABACEAE/ CESALPINIACEAE
27	Lamoty	<i>Flacourtia ramontchi</i>	SALICACEAE
28	Maintifototsy	<i>Diospyros perrieri</i>	EBENACEAE
29	Mampisaraka	<i>Protorhus humbertii</i>	ANACARDIACEAE
30	Manamora	<i>Malleastrum gracile</i>	MELIACEAE
31	Mandresy	<i>Ficus polita</i>	MORACEAE
32	Manendraky	<i>Cassine humbertii</i>	CELASTRACEAE
33	Mangarahara	<i>Stereospermum variabile</i>	BIGNONIACEAE
34	Mangiliankelika	<i>Brachylaena microphylla</i>	ASTERACEAE
35	Menahy	<i>Securinea sp</i>	EUPHORBIACEAE
36	Miandambo	<i>Obetia radula</i>	URTICACEAE
37	Monongo	<i>Zanthoxylum tsihanimposa</i>	RUTACEAE
38	Nonoka	<i>Ficus marmorata</i>	MORACEAE
39	Papolahy	<i>Tabernaemontana coffeoides</i>	APOCYNACEAE
40	Reripika	<i>Clerodendrum sp</i>	LAMIACEAE
41	Rombotsy	<i>Acacia sp</i>	FABACEAE/ MIMOSACEAE
42	Sakoa	<i>Poupartia caffra</i>	ANACARDIACEAE
43	Sakoambanditra	<i>Poupartia silvatica</i>	ANACARDIACEAE

44	Sanira	<i>Phyllanthus casticum</i>	PHYLLANTHACEAE
45	Sarivandrika	<i>Hyperacanthus sp</i>	RUBIACEAE
46	Satra	NI 5	NI 5
47	Selinala	<i>Grewia sp</i>	MALVACEAE/ TILIACEAE
48	Sely	<i>Grewia picta</i>	MALVACEAE/ TILIACEAE
49	Tain-kafitra	<i>Dombeya ambongensis</i>	MALVACEAE/ STERCULIACEAE
50	Talinala	<i>Terminalia rhopalophora</i>	COMBRETACEAE
51	Taly	<i>Terminalia sp</i>	COMBRETACEAE
52	Tanatananala	<i>Bivinia jalbertii</i>	SALICACEAE
53	Tanjaky	<i>Anacolosa pervilleana</i>	OLACACEAE
54	Taolandambo	<i>Rhopalocarpus similis</i>	SPHAEROSEPALACEAE
55	Tombopiso	NI 6	NI 6
56	Tratramborondreo	<i>Colubrina decipiens</i>	RHAMNACEAE
57	Tsialafika	<i>Gonioma malagasy</i>	APOCYNACEAE
58	Tsiandala	<i>Berchemia discolor</i>	RHAMNACEAE
59	Tsingena	<i>Albizzia sp</i>	FABACEAE/ MIMOSACEAE
60	Tsingilofilo	<i>Gymnosporia linearis</i>	CELASTRACEAE
61	Tsitake	<i>Rhus perrieri</i>	ANACARDIACEAE
62	Vandamena	<i>Dialium occidentale</i>	FABACEAE/ CESALPINIACEAE
63	Voafona	<i>Allophylus salignus</i>	SAPINDACEAE
64	Voandriky	<i>Vangueria sp</i>	RUBIACEAE
65	Vory	<i>Broussonetia greveana</i>	MORACEAE

NI : Non Identifiée

➤ Liste floristique (Morondava)

N°	Noms vernaculaires	Noms scientifiques	Famille
1	Adabo	<i>Ficus sycomorus</i>	MORACEAE
2	Akao	<i>Casuarina equisetifolia</i>	CASUARINACEAE
3	Andriambolafotsy	<i>Croton bernieri</i>	EUPHORBIACEAE
4	Apeny	<i>Strychnos vacacoua</i>	LOGANIACEAE
5	Arofy bohy	<i>Commiphora sp</i>	BURSERACEAE
6	Fihamy	<i>Ficus sp</i>	MORACEAE
7	Gonda	<i>Cordia myxa</i>	BORAGINACEAE
8	Halampo	<i>Kosteletzkya diplocrater</i>	MALVACEAE
9	Hazomby	<i>Strychnos decussata</i>	LOGANIACEAE
10	Hazomena	<i>Securinega perrieri</i>	EUPHORBIACEAE
11	Hazompasy	<i>Rinorea arborea</i>	VIOLACEAE
12	Kapoaka	<i>Ceiba pentandra</i>	BOMBACACEAE
13	Katrafay	<i>Cedrelopsis grevei</i>	RUTACEAE
14	Kily	<i>Tamarindus indica</i>	FABACEAE/ CAESALPINIACEAE
15	Kironono	<i>Capurodendron rubrocostatum</i>	SAPOTACEAE
16	Kitakitakala	<i>Menabea venenata</i> Baill.	APOCYNACEAE
17	Lalipito	<i>Homalium albiflorum</i>	SALICACEAE
18	Lamotimboay	<i>Flacourtia sp</i>	SALICACEAE
19	Lamoty	<i>Flacourtia ramontchi</i>	SALICACEAE
20	Latabarika	<i>Grewia cyclea</i>	MALVACEAE/ TILIACEAE



21	Lopingo	<i>Diospyros greveana</i>	EBENACEAE
22	Lopingo grandes feuilles	<i>Diospyros sp</i>	EBENACEAE
23	Mandresy	<i>Ficus polita</i>	MORACEAE
24	Mangarahara	<i>Stereospermum euphorioides</i>	BIGNONIACEAE
25	Manjakabenitany	<i>Baudouinia fluggeiformis</i>	FABACEAE/ CESALPINIACEAE
26	Mapilazy	NI 7	NI 7
27	Masonjoany	<i>Coptosperma madagascariense</i>	RUBIACEAE
28	Mokonazy	<i>Ziziphus mauritania</i>	RHAMNACEAE
29	Namologna	<i>Foetidia retusa</i>	LECYTHIDACEAE
30	Neem	<i>Azadirachta indica</i>	MELIACEAE
31	Piropitsokala	<i>Rothmania tropophylla</i>	RUBIACEAE
32	Relambo	<i>Uvaria manjensis</i>	ANNONACEAE
33	Rotrala	<i>Eugenia sp</i>	MYRTACEAE
34	Sely	<i>Grewia picta</i>	MALVACEAE/ TILIACEAE
35	Somitsoy	<i>Fernandoa grevei</i>	BIGNONIACEAE
36	Talinala	<i>Terminalia rhopalophora</i>	COMBRETACEAE
37	Taly	<i>Terminalia mantaly</i>	COMBRETACEAE
38	Tanjaky	<i>Anacolosa pervilleana</i>	OLACACEAE
39	Tratramborondreo	<i>Colubrina decipiens</i>	RHAMNACEAE
40	Tsilaiiby	<i>Stadmania oppositifolia</i>	SAPINDACEAE
41	Tsilaitsy	<i>Noronhia buxifolia</i>	OLEACEAE
42	Tsilavondria	<i>Hydrostachys maxima</i>	HYDROSTACHYACEAE
43	Tsingena	<i>Albizzia sp</i>	FABACEAE/ MIMOSACEAE
44	Tsivoanino	<i>Canthium bosseri</i>	RUBIACEAE
45	Tsivoaninombozo	<i>Buxus madagascariensis</i>	BUXACEAE
46	Voafona	<i>Allophylus salignus</i>	SAPINDACEAE
47	Vory	<i>Broussonetia greveana</i>	MORACEAE

Annexe 10 : Tableaux de présence-absence des espèces accompagnatrices inventoriées

➤ A Sakaraha

N° de l'espèce dans la liste floristique		JDC	Forêt Dense sèche (FDH)							Savane arbustive					Forêt artificielle			Fréquence absolue
		Acacia	Katrafay 1	Katrafay 2	Nonoke 1	Mandresy 1	Mandresy 2	Vory 1	Vory 2	Adabo 1&2	Adabo 3	Mandresy 3	Nonoke 2	Nonoke 3	Filao 1	Filao 2	Filao 3	
17	Hazokataky	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	6
52	Tanatananala	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	6
15	Forofoky	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	4
38	Nonoka	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	4
13	Filao	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	3
21	Katrafay	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
28	Maintifototsy	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3
31	Mandresy	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3
40	Reripika	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
48	Sely	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3
50	Talinala	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
53	Tanjaky	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	3
54	Taolandambo	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	3
2	Adabo	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
4	Ampoly vavy	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
5	Banaky	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
7	Dagoa	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
9	Faliandro	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
11	Fanazava	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	2
12	Fantsikakoholahy	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
18	Hazombalala	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
19	Hazomby	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2
26	Lambina	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
27	Lamoty	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	2

N° de l'espèce dans la liste floristique		JDC Acacia	Forêt Dense sèche (FDH)							Savane arbustive					Forêt artificielle			Fréquence absolue
			Katrafay 1	Katrafay 2	Nonoke 1	Mandresy 1	Mandresy 2	Vory 1	Vory 2	Adabo 1&2	Adabo 3	Mandresy 3	Nonoke 2	Nonoke 3	Filao 1	Filao 2	Filao 3	
30	Manamora	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
33	Mangarahara	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2
34	Mangiliankelika	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
43	Sakoambanditra	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
57	Tsialafika	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
59	Tsingena	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
61	Tsitake	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
62	Vandamena	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
65	Vory	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
1	<i>Acacia mangium</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
3	Ampoly lahy	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
6	Belelo	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8	Daronamboa	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10	Famata	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
14	Firavoanarivo	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
16	Fotsy avaliky	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
20	Kafenala	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
22	Kindroa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
23	Kiritralla	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
24	Kitata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
25	Lalipito	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
29	Mampisaraka	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
32	Manendraky	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
35	Menahy	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
36	Miandambo	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
37	Monongo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
39	Papolahy	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
41	Rombotsy	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

N° de l'espèce dans la liste floristique		JDC Acacia	Forêt Dense sèche (FDH)							Savane arbustive					Forêt artificielle			Fréquence absolue
			Katrafay 1	Katrafay 2	Nonoke 1	Mandresy 1	Mandresy 2	Vory 1	Vory 2	Adabo 1&2	Adabo 3	Mandresy 3	Nonoke 2	Nonoke 3	Filao 1	Filao 2	Filao 3	
42	Sakoa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
44	Sanira	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
45	Sarivandrika	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
46	Satra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
47	Selinala	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
49	Tain-Kafitra	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
51	Taly	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
55	Tombopiso	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
56	Tratramborondreo	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
58	Tsiandala	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
60	Tsingilofilo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
63	Voafona	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
64	Voandriky	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
42	Sakoa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
44	Sanira	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
45	Sarivandrika	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
46	Satra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
47	Selinala	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
49	Tain-Kafitra	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
51	Taly	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
55	Tombopiso	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
56	Tratramborondreo	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
58	Tsiandala	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
60	Tsingilofilo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
63	Voafona	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
64	Voandriky	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
		1	8	8	14	11	7	26	10	1	1	8	10	7	1	2	3	65

0 : absence      1 : présence

➤ A Morondava

N° de l'espèce dans la liste floristique	Jardin de case			Forêt Dense Sèche						Savane arbustive					Forêt artificielle			Fréquence absolue
	kpk2	kpk3	Mandresy1	Fihamy1	Fihamy2	Kily1	Kily2	Kily3	Vory1	Adabo1	Adabo2	Gonda 1	Gonda 2	kpk1	Akao1	Akao2	Akao3	
34 Sely	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	6
7 Gonda	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	5
14 Kily	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	4
2 Akao	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	3
4 Apeny	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
12 Kapoaka	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3
21 Lopingo	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3
25 Manjakabenitany	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3
28 Mokonazy	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	3
41 Tsilaitsy	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
46 Voafona	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	3
1 Adabo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
6 Fihamy	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
15 Kironono	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
18 Lamotimboay	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2
20 Latabarika	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
31 Piropitsokala	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
43 Tsingena	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
44 Tsivoanino	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
3 Andriambolafotsy	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

N° de l'espèce dans la liste floristique	Jardin de case			Forêt Dense Sèche						Savane arbustive					Forêt artificielle			Fréquence absolue
	kpk2	kpk3	Mandresy1	Fihamy1	Fihamy2	Kily1	Kily2	Kily3	Vory1	Adabo1	Adabo2	Gonda 1	Gonda 2	kpk1	Akao1	Akao2	Akao3	
5 Arofy bohy	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8 Halampo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
9 Hazomby	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10 Hazomena	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
11 Hazompasy	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
13 Katrafay	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
17 Lalipito	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
19 Lamoty	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
22 Lopingo grandes feuilles	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
24 Mangarahara	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
26 Mapilazy	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
27 Masonjoany	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
29 Namologna	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
30 Neem	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
32 Relambo	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
33 Rotrala	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
35 Somitsoy	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
36 Talinala	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
37 Taly	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
38 Tanjaky	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
39 Tratramborondreo	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
40 Tsilaiby	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
42 Tsilavondria	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
45 Tsivoaninombezo	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
47 Vory	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
16 Kitakitakala	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
23 Mandresy	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	1	1	2	8	9	10	7	9	8	11	3	2	5	4	1	1	1	47

0 : absence      1 : présence