

Sommaries

Remerciements.....	i
Sommaries	ii
Liste des illustrations.....	iii
Acronymes.....	v
Glossaire	vi
Résumé.....	vii
Abstract	viii
Famintinana	ix
I. Introduction	1
II. Problématique et hypothèses	2
II.1. Problématique	2
II.2. Hypothèses et Objectifs	3
III. Matériels et méthodes.....	4
III. 1. Site d'étude.....	4
III. 2. Etat de l'art	6
III. 3. Matériels d'études	10
III. 4. Méthodes	10
III. 5. Cadre opératoire	17
IV. Résultats et interprétations.....	18
IV.1. Effet du carottage sur la croissance, l'état du houppier et la stabilité de l'arbre	18
IV.2. Prolifération des agents biologiques de dégradations autour de la blessure	20
IV.3. Degré de cicatrisation.....	24
IV.4. Etat des bouchons.....	25
IV.5. Cas particuliers : analyse des arbres coupés illicitement à la hache	28
V. Discussions et recommandations.....	28
V.1. Discussions	28
V.2. Recommandations.....	33
VI. Conclusion	35
Références bibliographiques.....	36
Annexe	I

Liste des illustrations

Liste des annexes

Annexe 1 : Fiche individuelle d'un individu.....	I
Annexe 2 : Ecart entre les deux diamètres	II
Annexe 3 : Pourriture molle	II
Annexe 4 : Pourriture blanche ou fibreuse	III
Annexe 5 : Pourriture brune ou cubique.....	III
Annexe 6 : Cicatrisation d'un arbre blessé	IV
Annexe 7 : Principe d'identification de l'indice de conservation et d'évaluation de la durabilité naturelle à travers l'importance des dégâts observés (EDLUND).....	IV
Annexe 8 : Corrélation entre les paramètres analysés	V
Annexe 9 : Durabilité naturelle des espèces étudiées.....	V
Annexe 10 : Corrélation par rapport à l'état du bouchon.....	V
Annexe 11 : Coefficient de corrélation entre les indicateurs.....	VI
Annexe 12 : Trou entièrement cicatrisé après 4 ans sur <i>Alnus sp.</i>	VI
Annexe 13 : Coordonnées GPS des arbres carottés.....	VII

Liste des figures

Figure 1 : Diagramme ombrothermique de Gaussen de Tampolo- Température et pluviométrie moyenne sur 15 ans (2001- 2015).....	5
Figure 2 : Constitution d'un tronc d'arbre	6
Figure 3 : Ecart entre les deux diamètres mesurés en 2016 et en 2018	18
Figure 4 : Etat du houppier et stabilité des individus	20
Figure 5 : Degré d'attaque des champignons	22
Figure 6 : Attaque des insectes/larves	23
Figure 7 : Degré de cicatrisation après 20 mois	24
Figure 8 : Evolution de l'état des bouchons	27

Liste des planches

Planche 1 : Carottage	11
Planche 2 : Herbier	12
Planche 3 : Houppiers intacts	19
Planche 4 : Houppiers partiellement incomplets	19
Planche 5 : Attaque des champignons	21
Planche 6 : Attaque des insectes/larves	23
Planche 7 : Evolution de la cicatrisation des blessures à 20 mois	25
Planche 8 : Etat des bouchons	27

Liste des tableaux

Tableau 1-Température et précipitations mensuelles de la région de Fénérive Est	5
Tableau 2 : Liste des individus carottés	10
Tableau 3: Codification des paramètres analysés	15
Tableau 4 : Appréciation de l'intensité de corrélation	16
Tableau 5 : Cadre opératoire	17

Acronymes

- **CoFo** : Comité des forêts
- **DHP** : Diamètre à Hauteur de Poitrine
- **FAO**: « Food and Agriculture Organization »
- **FNUF** : Forum des Nations Unies sur les Forêts
- **GPS** : « Global Positioning System »
- **IBC** : « Increment Bore Coring »
- **MNHN** : Muséum National d'Histoire Naturelle
- **NAP** : Nouvelle Aire Protégée
- **UFR** : Unité de Formation et de Recherche
- **VTA** : « Visual Tree Assesment »

Glossaire

- **Bourrelet cicatriciel** : Cylindre de tissu ou de matière souple rempli de bourre fermé en rond et formant un coussin recouvrant une blessure.
- **Cal cicatriciel** : Bourrelet de tissu apparaissant au niveau d'une blessure chez un animal ou un végétal, et tendant à la recouvrir.
- **Descente de cime** : A la suite d'un stress important d'ordre hydrique, d'une attaque parasitaire ou encore suppression d'une partie des racines, l'arbre fait dépérir une partie de son houppier situé en générale en cime.
- **Pénétromètre** : Instrument de mesure utilisé en géotechnique pour établir la contrainte maximum admissible.
- **PHF** : Critère pour qualifier l'exposition de l'arbre, forme du houppier, forme du fût (variant chacun de 1 et 5)
- **Tarets** : Mollusques bivalves à corps très allongé, vermiformes, qui s'attaquent aux bois immergés dans l'eau de mer ou l'eau saumâtre.
- **Zones poreuses** : sont ceux dont les pores du bois de printemps (bois initial) sont plus gros que ceux du bois d'été (bois final) et dont le passage de l'un à l'autre se fait brusquement. Ces bois ont pour la plupart des anneaux de croissance bien démarqués et leur texture est irrégulière.

Résumé

La présente étude concerne l'analyse de l'état sanitaire des arbres sur lesquels des carottes de bois ont été prélevées. Les prélèvements des carottes ont été effectués en 2016 par l'équipe de l'UFR bois dans la forêt de la Nouvelle Aire Protégée de Tampolo, et ce sont des résultats de 20 mois qui sont analysés. L'étude concerne 12 individus appartenant à 8 espèces réparties dans 7 genres et 7 familles différentes. Les analyses effectuées concernent l'effet du carottage sur la croissance, l'état du houppier, la stabilité de l'arbre, la prolifération des agents biologiques de dégradation comme les champignons et les insectes, et le degré de cicatrisation de la blessure. Pour cela, des échelles de valeurs (codification) ont été établies pour chacun de ces paramètres. Les résultats ont montré que la croissance des arbres continue toujours et que tous les arbres carottés sont stables. Il y a prolifération des champignons et des insectes autour de la blessure, cette prolifération est principalement liée à l'humidité de l'arbre. Néanmoins, la cicatrisation de la blessure commence, et elle est liée aux paramètres champignons et humidité, mais aussi à l'épaisseur de l'écorce. Le facteur espèce influence significativement la prolifération des champignons sur l'aubier ($\alpha = 15\%$) et sur l'écorce ($\alpha = 10\%$). Il influence aussi la prolifération des insectes/larves sur l'aubier ($\alpha = 30\%$) et sur l'écorce ($\alpha = 10\%$). A chaque espèce correspond une durabilité naturelle, et donc une certaine résistance aux agents de dégradations. Le facteur espèce a une influence hautement significative ($\alpha = 5\%$) sur le degré de cicatrisation de la blessure. Les paramètres les plus corrélés au degré de cicatrisation sont la prolifération des champignons et des insectes, l'humidité et l'épaisseur de l'écorce. Concernant le rebouchage des trous, des études plus poussées devraient être effectuées pour connaître son effet sur la blessure. Le carottage est encore une méthode peu utilisée à Madagascar, il a l'avantage d'être moins destructrice que l'abattage. Néanmoins, la méthode comportera toujours un certain risque d'impacts négatifs pour l'arbre, il a des effets sur l'état sanitaire de l'arbre mais ces effets devraient disparaître après cicatrisation des blessures. Il faudrait, de ce fait, considérer soigneusement la faisabilité du carottage au cas par cas sur une plus longue durée. L'étude doit également être effectuée sur plusieurs individus se trouvant dans différents endroits avec des conditions écologiques différentes pour approfondir les études sur l'effet du carottage sur les arbres à Madagascar.

Mots clés : carottage, arbre, état sanitaire, cicatrisation, durabilité naturelle, croissance, Tampolo, Madagascar

Abstract

The present study aims to analyze the sanitary state of trees after coring made in 2016 by the Wood Sciences research Unit in the forest of the New Protected Area of Tampolo, and the results show the health assessment conducted 20 months later. The main study concern 12 cored trees that belong to 8 species, 7 genera from 7 different families. The performed analysis concerns the consequences of wood coring on the tree growth, the stability and the crown health, the degrees of attack by biological agents causing wood degradation including fungi and insects, the degree of recovery. For the analysis, a value scale (codification) was established for each parameter. The results show that trees continue to grow and are all stable. There is a proliferation of fungi and insects seen around the affected area that are essentially related to the moisture content of the tree. Therefore, recovery of the holes is seen, related to the parameters fungi and humidity, but also to the thickness of the bark. The species factor affects significantly the proliferation of fungi on the sapwood ($\alpha = 15\%$) and on the bark ($\alpha = 10\%$). Also, it significantly affects the proliferation of insects / larvae on the sapwood ($\alpha = 30\%$) and on the bark ($\alpha = 10\%$). To each specie correspond a natural durability and a certain resistance to the agents of degradation. The species factory significantly affects the healing degree of the affected area ($\alpha = 5\%$). The parameters mostly correlated to the healing degree are the proliferation of fungi and insects, the humidity and the thickness of the bark. About filling/plugging the holes, there should be a deep research to know all the consequences on the affected area. Tree coring is an underused method in Madagascar, but compared to the tree felling, it is less destructive. However, the method always entail certain risk on the tree, it can affect the health of the tree but all these effects should disappear after the recovery of the affected area. It would be necessary, therefore to consider carefully the feasibility of coring on a case-by-case over a longer duration. The research should also be done on several trees located in various ecological conditions to further the study on the effect of tree coring in Madagascar.

Keywords : coring, tree, sanitary state, recovery, natural durability, growth, Tampolo, Madagascar.

Famintinana

Ity asa fikarohana ity dia natao mba handalinana ny fiantraikan'ny "carottage" amin'ny fahasalam'an'ny hazo, ireo "carottage" ireo dia nataon'ny ekipan'ny « UFR bois » tamin'ny 2016 tao anatin'ny faritr'ala arovana Tampolo. Famakafakana ny toetoetry ny hazo 20 volana taorian'ny nanagoahana azy no atao. Ity asa ity dia natao tamin'ny hazo miisa 12 ao anaty karazan-kazo 8 ary fianaraviana karazany 7 samihafa. Ny fanadihadiana ny fahasalam'an'ny hazo tsirairay dia mikasika ny fitombon'ny hazo, ny fijoroan'ny hazo, ny firafitry ny laha-kazo aman-dravina ("houppier"), ny fihanaky ny holatra na bibikely manan'elatra manodidina ny fery ary ny toe-panolaran'ny fery. Hita ary fa mitohy foana ny fitombon'ny hazo ary mbola mijoro foana izy ireo na dia nogoahana aza. Mety misy ny fihanaky ny holatra sy ny bibikely manan'elatra manodidina ny fery, izany dia manana fifandraisana amin'ny hamandon'ny fery. Na dia eo ary izany dia misy ny fanolaran'ny fery, izay miankina amin'ny fihanak'ireo bibikely sy holatra mpanimba hazo, ny hamandoan'ny fery ary koa ny hatevin'ny hodi-kazo. Miovaova araky ny karazan-kazo ny fihanak'ireo holatra sy bibikely, na amin'ny hodi-kazo izany na amin'ny ati-hazo. Ireo karazan-kazo ireo dia samy manana ny fahatzany ara-boazanahary mba hanohitra ireo bibikely sy holatra mpanimba hazo. Tena samihafa ny fahafaha-manolatry ny fery isaky ny karazan-kazo. Amin'ireo toetra maronofakafakaina ireo, dia ny fihanaky ny hova/bibikely mpanimba hazo, ny hamandoana ary ny hatevin'ny hodi-kazo no tena manana fiantraikany amin'ny toe-panolaran'ny fery. Mikasika ny fanapenana ny lavaka nogoahana indray dia tokony hisy famakafakana lalindalina kokoa mba hahafantarana ny fiantraikany amin'ny fery. Mbola vitsy ny fampiasana io teknika fanagoahana hazo io eto Madagasikara, tsaratsara kokoa ny mampiasa azy raha ampitahaina amin'ny fanapahana hazo. Nefa io teknika io dia misy fiantraikany amin'ny hazo ihany, izay tokony tsy ho hita intsony rehefa mikatona ny fery ka vita ny fanolarany. Noho izany, tokony fakafakaina tsara ny fepetra ahafahana manao ny fanagoahana hazo isaky ny tranga, mandritra ny fotoana maharitra, miaraka amin'ny hazo maro kokoa ary any amin'ny toerana samihafa toetany. Izany dia atao mba handalinana be be kokoa ny fiantraikan'ny fanaovana an'io teknika io eto Madagasikara.

Teny fototra : "carottage", fanagoahana, hazo, toe-panolaran'ny fery, fitomboana habe, Tampolo, Madagasikara.

I. Introduction

Actuellement, les forêts et autres types de terres boisées couvrent au total près de 4 milliards d'hectares dans le monde, soit 30% de la superficie des terres émergées (FAO, 2014). L'importance de la forêt repose sur le fait qu'elle constitue un écosystème ayant quatre principaux services écologiques à savoir les services d'auto-entretien, qui conditionnent le bon fonctionnement des écosystèmes (recyclage des nutriments, production primaire, cycle de carbone, etc.), les services d'approvisionnement qui conduisent à des biens appropriables, les services de régulation c'est-à-dire la capacité à moduler dans un sens favorable à l'homme des phénomènes comme le climat, et enfin, les services culturels comme l'utilisation de la forêt à des fins récréatives, esthétiques et spirituelles (Fabrégat, 2009).

De nombreux organismes comme la FAO, le Cofo ou le FNUF entre autres, œuvrent pour assurer l'avenir des forêts, premier réservoir de diversité biologique terrestre et facteur de lutte contre le changement climatique, pour le bien-être des générations présentes et futures. L'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, à travers la Mention Foresterie et Environnement, figure parmi les gestionnaires d'aires protégées à Madagascar. En effet, elle est responsable de la gestion de la NAP Tampolo et vise ainsi à préserver sa pérennité. Cette NAP fait partie de la forêt littorale de l'Est de Madagascar, et ces forêts humides de l'Est sont considérées parmi les zones prioritaires en matière de conservation de la biodiversité dans le monde. Pour la réussite de la conservation, les communautés locales ont toujours été incluses dans la gestion de ce site, et en collaboration avec les divers partenariats techniques et financiers (la direction régionale des Eaux et Forêts, les forces de l'ordre, l'Université de Toamasina, les différentes Fondations et ONG). Malgré cela, d'année en année, cette forêt de Tampolo subit toujours de nombreuses pressions. Des exploitations illicites de ses ressources naturelles ont continué malgré les différentes stratégies de conservation à des différents niveaux dans la forêt (Ratsirarson et Goodman, 1998). Mais toutes les espèces présentes ne sont pas exploitées, et cela peut s'expliquer par certaines raisons.

D'un côté, il y a des espèces qui sont surexploitées, qui sont assez connues du public et dont les propriétés technologiques sont connues. D'un autre côté, il y a des espèces sous-exploitées, moins connues mais qui peuvent être abondantes dans la forêt et dont les propriétés sont inconnues. Les propriétés du bois influencent beaucoup ses performances et son utilisation : un bois appartenant à une espèce peut être plus adapté pour une utilisation qu'un bois appartenant à une autre espèce. La connaissance de ces propriétés du bois est donc très importante pour son utilisation optimale. Il est alors primordial de connaître les caractéristiques physiques et mécaniques des bois. Parmi ces principales propriétés figurent la densité, la durabilité naturelle, la dureté, les modules d'élasticité, les propriétés chimiques (taux d'extractibles, de lignine, de cellulose). La plupart des méthodes utilisées en laboratoire pour caractériser ces propriétés sont des méthodes destructives, nécessitant des échantillons de grande taille et donc d'un abattage de l'arbre. De plus, généralement, pour faire

ces analyses, il faut à la fois du duramen et de l'aubier pour considérer la variabilité radiale, et il faut plusieurs répétitions, et donc beaucoup d'abattages. Mais ces abattages répétés détruisent la forêt à long terme.

Actuellement, grâce à l'avancé de la technologie, il existe des méthodes de prélèvement d'échantillon moins destructives comme le carottage. Il peut être défini comme le prélèvement d'un morceau de l'arbre, en forme de carotte, effectué dans le sens radial de l'arbre. Pour cela, le prélèvement des carottes s'effectue à l'aide d'une tarière ou mèche, manuelle ou motorisée. Comparable à un tire-bouchon, elle s'enfonce dans le tronc et découpe un fin cylindre de bois. L'équipe de l'UFR « science du bois » de la Mention Foresterie et Environnement a effectué des carottages dans la forêt de Tampolo sur 30 arbres, en juin 2016 à l'aide d'une carotteuse électrique. Même si cette méthode est considérée comme non destructive par rapport à l'abattage et au prélèvement de rondelle (Burnel et Pélissier, 2009), elle pourrait avoir des effets négatifs sur l'arbre. D'où cette étude sur le « Suivi de l'état sanitaire des arbres de la forêt de Tampolo sur lesquels ont été prélevées des carottes de bois : résultats de 20 mois ». L'analyse de l'état sanitaire de l'arbre se traduit par l'analyse de sa croissance, sa stabilité, état du houppier, de sa résistance aux différents agents biologiques de dégradation (présence de pourritures, champignons lignivores, insectes, larves, etc.), de l'évaluation du degré de cicatrisation de la blessure. L'originalité de ce travail réside dans le fait qu'il n'y a encore eu que très peu d'étude dans le monde sur l'effet du carottage sur les arbres (Jozsa, 1988 ; Helliwell, 2007) et qu'aucune étude sur ce sujet n'a encore été menée à Madagascar. Ainsi, après la partie matériels et méthodes seront expliqués dans la partie résultats les effets du carottage sur la croissance et la santé de l'arbre, ainsi que les facteurs qui les influencent ; suivis de la discussion et des recommandations. Finalement dans la dernière partie se trouve la conclusion.

II. Problématique et hypothèses

II.1. Problématique

Pour caractériser les propriétés du bois par des méthodes directes en laboratoire, il faut prendre des échantillons de bois. Cependant, on ne peut les observer qu'en utilisant des échantillons de bois provenant de l'intérieur des arbres vivants (Millier *et al.*, 2006). De plus, pour une bonne connaissance des propriétés du bois, pour une diversité et représentativité de l'arbre, il faut à la fois du duramen et de l'aubier. Et suivant les propriétés à caractériser, il faut souvent des échantillons de grandes tailles, avec plusieurs répétitions, ne provenant pas forcément des branches mais du fût de l'arbre, d'où le recours à plusieurs abattages d'arbres.

Or, l'abattage de l'arbre peut entraîner sa mort, surtout si l'espèce considérée ne donne pas de rejet de souche. Ces abattages sont ainsi effectués au détriment des ressources forestières, les conséquences sont d'autant plus accentuées concernant les espèces qui sont rares ou qui sont menacées. Pour cela, on peut procéder au carottage de l'arbre qui consiste à prélever une carotte de

bois, dans le sens radial (écorce-moelle ou écorce-moelle-écorce). Même si cette méthode est considérée comme non destructive par rapport à l'abattage, elle peut avoir des effets sur la croissance de l'arbre, sur son état sanitaire et même sa survie. Et aucune étude n'a encore été effectuée à Madagascar pour analyser l'effet du carottage sur arbre. Ainsi, la question principale qui se pose est : **Comment la pratique du carottage sur un arbre porte-t-elle atteinte à son état sanitaire ?**

II.2. Hypothèses et Objectifs

II.2.1. Hypothèses

Deux hypothèses ont été émises afin de répondre à la problématique. Ces hypothèses seront analysées et vérifiées tout au long de cette étude.

- Hypothèse 1 : Le prélèvement d'une carotte de bois sur un arbre n'a pas arrêté sa croissance.

En effet, la pratique du carottage sur un arbre peut avoir des conséquences sur la croissance de cet arbre. La perforation effectuée pendant le prélèvement pourrait endommager considérablement des vaisseaux conducteurs de sèves indispensables pour la croissance de l'arbre et pourrait alors nuire à sa survie. Le principal paramètre d'évaluation de la croissance considéré est le DHP. D'autres paramètres liés à l'état général de l'arbre ont aussi été analysés comme la stabilité de l'arbre et la forme du houppier.

- Hypothèse 2 : La prolifération des agents biologiques de dégradation autour de la blessure et la cicatrisation de l'arbre dépend de l'espèce de l'arbre.

On entend par cicatrisation l'état d'une blessure qui s'est guéri laissant ainsi une marque, plus précisément une cicatrice. La présence de cicatrisation indique donc une « guérison » de l'arbre. Cette cicatrisation suit 3 étapes telles que : la production de bourrelet visible (généralement à partir du phloème qui se trouve près de l'écorce), l'évolution du cal cicatriciel et enfin la cicatrisation proprement dite. La vitesse de cicatrisation peut dépendre de plusieurs facteurs, de même que la prolifération des agents biologiques de dégradation autour de la blessure. Parmi ces facteurs peuvent figurer l'espèce à laquelle l'arbre appartient, ou les techniques utilisées pour traiter la blessure comme le rebouchage du trou. Exemple avec le bouchon dans le trou, il est possible que la vitesse de cicatrisation puisse être réduite et que les agents de dégradation prolifèrent plus.

II.2.2. Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette étude est d'analyser si le carottage de bois effectué sur les arbres de la forêt de Tampolo a des effets négatifs sur les arbres.

Les objectifs spécifiques consistent à :

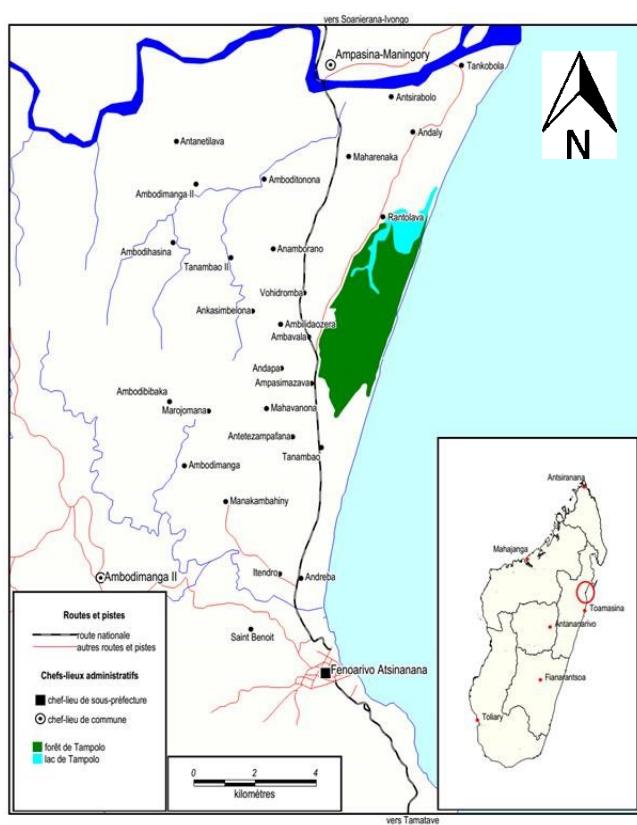
- Analyser l'effet du carottage sur la croissance et la survie de l'arbre
- Analyser le niveau d'attaque des agents biologiques de dégradation
- Analyser les facteurs qui influencent la cicatrisation de la blessure de l'arbre
- Evaluer la cicatrisation de l'arbre par rapport à la présence de bouchon

III. Matériels et méthodes

III. 1. Site d'étude

III.1. 1. Situation géographique

La NAP de Tampolo est localisée dans la Région Analanjirofo, District de Fénérive-Est. Elle est située à 10 km au nord de la ville de Fénérive Est, entre le littoral Est et la Route Nationale n°5 reliant Toamasina et Maroantsetra (carte 1). Elle fait partie des vestiges de la forêt littorale longeant la partie orientale de Madagascar. La forêt de Tampolo s'étend sur 10 km le long de la côte Est et sur 2 km de large au maximum, avec une superficie de près de 675,46 ha. Cette forêt a obtenu le statut de Nouvelle Aire Protégée de catégorie V en 2006. Ce site se trouve environ à 49°25'E de longitude, 17°17'S de latitude avec une altitude entre 5 et 10 m (Goodman & Ratsirarson, 1998).



Source : Ratsirarson *et al.*, 2001

Carte 1 : Localisation de la forêt de Tampolo

Cette forêt est constituée par différents types de formations végétales telles que la forêt littorale, la forêt temporairement inondée et la forêt marécageuse (Rajoelison, 1995).

III.1. 2. Milieu physique

❖ Climat

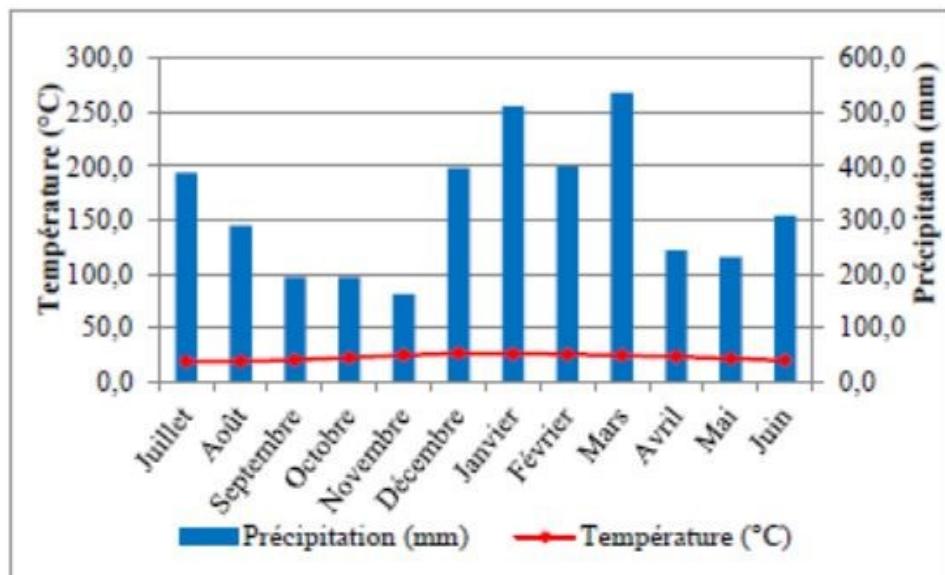
Le climat de la région est du type perhumide chaud, caractérisé par l'absence de mois écosc (figure 1). La pluviométrie annuelle moyenne est de 2712 mm répartie sur 196 jours. La saison la plus humide débute en Septembre et se termine en Mars. La température moyenne est relativement constante et tourne autour de 25 °C (tableau 1).

Dans l'ensemble, le District de Fénérive-Est subit au moins une dépression cyclonique sur deux, apportant plus de pluies que de vents (100 à 175 mm de pluies) par an. Deux dépressions sur trois sont accompagnées d'une hauteur de pluies cumulées supérieure à 175 mm (Raholivello, 1994).

Tableau 1-Température et précipitations mensuelles de la région de Fénérive Est

	Juil.	Aoû	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar	Avri	Mai	Juin
T°max	25,5	25,4	26,4	27,6	29,2	30,4	30,8	30,7	30,2	29,4	27,8	27,6
T°min	16,8	16,7	17,4	18,7	20,6	21,7	22,3	22,5	20,5	20,9	19,1	17,6
T°moy (°C)	25,5	25,4	26,4	27,6	29,2	30,4	30,8	30,7	30,2	29,4	27,8	27,6
Précipitation (mm)	280	163	100	95	147	275	437	296	451	196	166	172
Jour de pluies	19,3	20,4	15,0	15,0	13,4	16,9	20,0	15,0	18,8	13,8	14,2	17,2

Source : Service de la météorologie, Ampandrianomby, Antananarivo



Source : Donnée climatique ESSA-Forêts Tampolo

Figure 1 : Diagramme ombrothermique de Gaussen de Tampolo- Température et pluviométrie moyenne sur 15 ans (2001- 2015)

❖ Pédologie

La forêt de Tampolo repose sur un sol de type sableux, très perméable, pauvre en matière organique, et acide avec un pH de 2,7. Cette pédologie explique une diversité spécifique de la structure de la végétation. D'après Jehanno (2011), on distingue quatre types de sols de l'intérieur des terres vers la mer :

- Sols peu évolués à nappes phréatiques profondes
- Sols podzoliques dans les bas-fonds
- Sols hydromorphes tourbeux dans les parties marécageuses

- Sols pseudo podzols de nappes constitués par des dépôts de sable en zones temporairement inondées.

III. 2. Etat de l'art

III.2. 1. Constitution d'un tronc d'arbre : rôle des principales parties du tronc

Sur le plan R-T (radial-tangential), les principales parties d'un tronc d'arbre sont, depuis l'extérieur vers l'intérieur, l'écorce, le phloème, le cambium, l'aubier et le bois de cœur (figure 2). Il y a plusieurs cernes concentriques où chaque cerne résulte d'une année de croissance, il est constitué par le bois final formé en fin de saison de végétation et le bois initial formé en début de saison de végétation.

L'écorce, une couche imperméable lisse, rugueuse ou fissurée, constitue l'enveloppe extérieure, entourant et protégeant le tronc et les branches. Elle protège l'intérieur de l'arbre contre les éléments extérieurs, les maladies, les insectes et les animaux. Elle comprend des millions de pores minuscules (lenticelles) qui laissent passer l'oxygène vers les tissus internes (Lissan, 2014).

Le cambium est une partie vitale de l'arbre puisqu'il correspond à la zone où a lieu la production des couches de tissus cellulaires. Il y a une production de bois sur sa face interne et de liber (transformé par la suite en écorce) sur sa face externe.

Le liber est une couche située entre l'écorce et l'aubier qui, par des tubes criblés, assure le transport de la sève élaborée venant des feuilles, où s'effectue la photosynthèse, vers les différentes parties de l'arbre (Ghazil, 2010).

L'aubier fait partie des tissus vivants de l'arbre. C'est la partie fonctionnelle du xylème ou du bois. Parmi ses fonctions existe la fonction du parenchyme qui assure une défense contre les champignons (Pouzoulet *et al.*, 2017). C'est également dans cette zone que circule de manière ascendante la sève brute. En se déplaçant vers le centre de l'arbre, les parois cellulaires se transforment et les tissus meurent. C'est alors du bois parfait ou bois de cœur. Si le bois de cœur est facilement identifiable de l'aubier alors il est appelé duramen (Limousin, 2011).

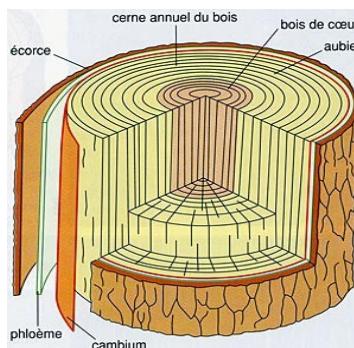


Figure 2 : Constitution d'un tronc d'arbre

III.2. 2. Composition chimique du bois

Le bois proprement dit est un mélange de trois polymères naturels : cellulose, lignine et hémicelluloses, respectivement dans des proportions approximatives de 50%, 20%, 20%, variables selon l'espèce. Il y a aussi les extractibles qui représentent généralement moins de 10% de la masse sèche du bois, et les matières minérales en quantité infime. La lignine est un polymère avec des motifs "phénol-propane" tandis que la cellulose et les hémicelluloses sont des polymères formés à partir de molécules de monosaccharides ou oses (sucres simples). L'ensemble cellulose et hémicelluloses forme l'holocellulose.

❖ *Cellulose*

La cellulose, appelée aussi alpha-cellulose est une macromolécule formée de cycles enchaînés linéairement, c'est-à-dire environ 500 à 5000 unités de monomères de glucose reliées les unes aux autres par des liaisons β -1,4-glycosidiques. Les différentes chaînes placées côte à côte sont liées par de nombreuses liaisons hydrogène, ce qui donne à ce matériau une très grande rigidité et qui explique qu'elle est la substance de soutien (parois) des cellules jeunes des végétaux.

❖ *Hémicellulose*

Les hémicelluloses sont des polymères plus courts (masse molaire plus faible) ou ramifiés formés à partir de pentoses (oses à cinq atomes de carbone comme la xylose), ou d'hexoses autres que le glucose (galactose par exemple). Quelle que soit l'espèce d'arbre, on retrouve la même structure pour la cellulose alors que les hémicelluloses ont des compositions et des structures qui varient considérablement selon qu'elles proviennent de feuillus ou de résineux. Les hémicelluloses de feuillus sont généralement plus riches en pentoses, que celles des résineux qui habituellement contiennent davantage d'hexoses.

❖ *Lignine*

C'est le troisième constituant de la paroi cellulaire (constituant de la paroi secondaire des cellules des végétaux) ; c'est un polymère réticulé (tridimensionnel) dont la structure complexe varie en fonction de l'espèce, de l'âge du végétal et des conditions climatiques. La lignine agit comme un ciment entre les fibres du bois et comme élément rigidifiant à l'intérieur des fibres.

❖ *Les substances extractibles*

Les substances extractibles sont les constituants qui intéressent le plus dans cette étude. Ce sont des molécules de faible poids moléculaire se trouvant dans la structure poreuse du bois. On les appelle extractibles parce qu'elles sont solubles dans les différents solvants organiques usuels ou dans l'eau, et peuvent en conséquence être extraites du bois. Les extractibles sont constitués en grande partie de métabolites secondaires, c'est-à-dire des composés qui ne sont pas indispensables à la croissance de l'arbre. Ces molécules peuvent être lipophiles ou hydrophiles. La teneur et la composition des extractibles varient en fonction de l'essence, de la partie de l'arbre étudiée, de

l'âge, du site géographique, de la saison de récolte et du temps d'entreposage ; sa teneur peut même varier dans un même arbre comme de la moelle à l'écorce. Les extractibles sont responsables de certaines caractéristiques du bois telles que la couleur, l'odeur, la durabilité naturelle (résistance aux agents de dégradation biologique : bactéries, champignons, insectes, termites), les propriétés acoustiques et influencent certains procédés de transformation (collage, finition, mise en pâte) (Gierlinger *et al.*, 2004 ; Krutul, 1992 ; Aloui *et al.*, 2004).

Les extractibles contribuent à la protection du bois contre des agents d'altérations. La durabilité naturelle d'un bois est liée aux extractibles qu'il contient (Taylor *et al.*, 2006 ; Santana *et al.*, 2010 ; Maranhão *et al.*, 2013 ; Razafimahatratra *et al.*, 2017). Le bois de cœur, plus riche en extractibles que l'aubier est en général plus résistant aux agents d'altération du bois (Saha Tchinda, 2015).

III.2. 3. Les agents biologiques de dégradation

Certains êtres vivants sont capables de digérer le bois. Il s'agit des agents de dégradation biologique du bois qui sont représentés principalement par les champignons, insectes coléoptères, de termites, larves, mollusques et crustacés.

❖ Les champignons

Il existe 2 grandes familles de champignons :

• *Les lignivores :*

Ces champignons sont capables de dégrader le bois appartenant à de nombreuses espèces. Il suffit que ces spores tombent sur du bois humide pour qu'elles pénètrent dans le bois. Ce phénomène ne peut avoir lieu que dans le bois humide puisqu'il nécessite en général un apport d'eau mais aussi d'oxygène et une température élevée pour s'y propager. Il existe trois types de champignons lignivores :

- La pourriture fibreuse, aussi appelée pourriture blanche, est une maladie cryptogamique du bois provoquée par des champignons lignivores qui dégradent simultanément la lignine et la cellulose. Le bois atteint de pourriture fibreuse se décompose en petites fibres et prend une coloration très claire en présence d'un très fort taux d'humidité (annexe 4). Les principaux vecteurs de la pourriture fibreuse sont le polypore des caves (comme *Donkioporia expansa*), le *Pycnoporus* (*Pycnoporus cinnabarinus*), et les *Collybia* (CTBA, 2000).
- La pourriture molle (annexe 5) est une maladie cryptogamique provoquée par des micro-champignons qui détruisent la cellulose du bois. Une attaque de ces champignons n'est décelable de l'extérieur que tardivement. Le bois attaqué est par contre très tendre et peut être enfoncé sans peine et perd ses propriétés mécaniques. Le principal vecteur de la pourriture molle est le *Chaetomium globosum* et son développement nécessite la présence d'un très fort taux d'humidité et un apport nutritif en sels minéraux (CTBA, 2000).

- La pourriture cubique (annexe 3), dite aussi pourriture brune, décrite par l'oxymore « dry rot » (pourriture sèche) en anglais, est une maladie cryptogamique provoquée par des micro-champignons qui dégradent la cellulose du bois (sans toucher à la lignine). Il s'agit d'une forme de pourriture du bois caractérisée par des fissures délimitant des parallélépipèdes plus ou moins réguliers et par une coloration foncée ; l'aspect du bois dégradé est proche de celui du bois calciné.

- *Les lignicoles*

Les décolorations du bois résineux et de quelques essences feuillues, abattues, sont dues à un envahissement du bois par des champignons lignicoles. Les plus connus sont ceux qui donnent au bois une coloration plus ou moins intense : ils sont désignés ainsi comme agents de bleuissement du bois.

- ❖ **Les autres parasites des arbres**

- *Térébrants marins*

Dans l'eau de mer vivent les tarets et les mollusques bivalves qui utilisent leur valve comme outils de forage.

- *Coléoptères à larve xylophage*

Les coléoptères responsables des attaques du bois appartiennent surtout aux familles des Cérambycidés (capricornes), des Anobiidés (vrillettes) et des Lyctidés (lyctus) :

- Les capricornes des maisons sont des insectes des zones tempérées, ils s'attaquent aux résineux, uniquement dans l'aubier si le bois parfait est duraminisé.
- Les petites et grosses vrillettes ont des longueurs respectives de 2,5 à 5 mm et 5 à 7 mm, elles s'attaquent aux espèces de résineux et de feuillus, de préférence déjà infestées par des champignons lignivores qui prédigèrent en quelque sorte le bois et l'enrichissent en protéines.
- Les lyctus sont des petits insectes de 2,5 à 6 mm de long, la femelle dépose ses œufs à l'aide d'une tarière de ponte à l'intérieur de vaisseaux ayant un diamètre supérieur ou égal à 0,07 mm. Les bois attaqués sont donc généralement les feuillus à zone initiale poreuse, le noyer et de nombreux bois tropicaux, uniquement dans l'aubier si le bois parfait est duraminisé.

- *Termites*

Ils vivent en sociétés organisées en castes. Leur nourriture de base est la cellulose, qu'ils digèrent à l'aide de symbiotes (Trouy, 2016). Ces termites sont les plus redoutables ennemis du bois.

III. 3. Matériels d'études

Les arbres sur lesquels des carottes de bois ont été prélevées en 2016 sont au nombre de 30. Mais seuls 22 d'entre eux ont été retrouvés et analysés. Et sur ces 22 individus, 10 ont déjà été coupés (coupe illicite par hache), donc les 12 individus non coupés ont été analysés. Ces 12 individus appartiennent à 8 espèces, 7 genres et 7 familles (tableau 2). L'analyse de l'effet du carottage sur les arbres est donc effectuée 20 mois après prélèvement des carottes.

Tableau 2 : Liste des individus carottés

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Famille	Nombre	
			Non coupé	Coupé
Aferonakavy	<i>Elaeocarpus alnifolius</i>	ELAEOCARPACEAE	3	3
Dodoka	<i>Gaertnera macrostipula</i>	RUBIACEAE	1	0
Hazoambo	<i>Xylopia</i> sp.	ANNONACEAE	1	0
Rarà	<i>Brochoneura acuminata</i>	MYRISTICACEAE	2	0
Tsilongodongotra	<i>Dicoryphe macrophylla</i>	HAMAMELIDACEAE	1	1
Tsilongodongotra	<i>Dicoryphe stipulacea</i>	HAMAMELIDACEAE	1	0
Tsopatika	<i>Streblus dimepate</i>	MORACEAE	1	0
Voantsilaka	<i>Polyscias</i> sp.	ARALIACEAE	2	0
Hazomamy	<i>Anisophylea fallax</i>	ANISOPHYLEACEAE	0	1
Hazombatofotsy	<i>Homalium</i> sp.	SALICACEAE	0	2
Maimbovitsika	<i>Pittosporum verticillatum</i>	PITTOSPORACEAE	0	1
Tsifo	<i>Canthium</i> sp.	RUBIACEAE	0	2
Sous-total			12	10
Total				22

III. 4. Méthodes

III.4.1. Recherches bibliographiques

Avant les travaux de terrains, des recherches bibliographiques sur le suivi de l'état sanitaire des arbres ont été effectuées. Ces recherches ont permis de mieux comprendre les causes et les conséquences du carottage sur l'état actuel des arbres sur lesquels ont été prélevées des carottes de bois. Elles ont aussi par la suite permis d'identifier les différents paramètres à collecter sur terrain à travers une fiche individuelle pour chaque arbre. Ainsi, une fiche individuelle a été établie pour chaque arbre pour faciliter le suivi et analyse de chaque arbre sur terrain (annexe 1).

III.4.2. Prélèvements des carottes en 2016

Les carottes de bois ont été collectées en juin 2016 sur des arbres à l'aide d'une perceuse carotteuse, électrique, munie d'une mèche spéciale conçue pour ces travaux d'extraction de carottes de bois. Le dispositif est formé d'une mèche de diamètre intérieur de 1,5 cm et de longueur 19 cm, d'une rallonge mèche de longueur 33 cm, d'un adaptateur rallonge-perceuse, et d'une perceuse électrique alimentée par un groupe électrogène. La longueur mèche et rallonge est de 50 cm. Cette

mèche est plus volumineuse par rapport aux tarières les plus courantes qui mesurent 40 cm de long pour un diamètre intérieur de 5 mm et un diamètre extérieur de 1 cm (Geremia et Nassau, 2006).

La méthode effectuée consistait à percer l'arbre à une hauteur de 1,10 à 1,30 m au-dessus du sol et à prélever une carotte traversant l'arbre de part et d'autre (écorce-moelle-écorce). Tous les arbres sur lesquels les prélèvements ont été effectués ont un DHP supérieur à 8 cm (planche 1). Lors des prélèvements des carottes, plusieurs informations concernant les arbres étudiés et leur environnement ont été collectées. Parmi ces informations figurent les paramètres dendrométriques (DHP, hauteur totale, hauteur du fût), l'index PHF, la pente du terrain et coordonnées géographiques des arbres. Les trous de carottage dans les arbres cibles ont été par la suite rebouchés à l'aide de branches pour essayer de limiter les attaques par des agents biologiques.



Prélèvement de la carotte de bois



Mesure de la circonférence en 2016



Une carotte de bois



Arbre carotté sans bouchon

Source : Auteur, 2018.



Arbre bouché après carottage

Planche 1 : Carottage

III.4.3. Recherche de l'emplacement des individus, collecte d'herbiers

Les travaux de terrain pour collecter des informations pour le suivi de l'état sanitaire des arbres carottés ont été effectués en janvier 2018. Afin de trouver l'emplacement des arbres, assisté par des guide-botanistes locaux, ce sont les coordonnées géographiques (GPS) des arbres qui ont été utilisées (annexe 13).

Afin de connaître le nom scientifique de certains individus encore non identifiés et également pour assurer la concordance avec les individus pris en 2016, un herbier comprenant des fleurs/fruits, si possible, pour chaque espèce a été collecté (planche 2). Ces échantillons botaniques ont été étalés

soigneusement, mis dans des chemises cartonnées, imprégnés d'alcool 90° puis maintenus serré dans du presse papier. Pour chaque échantillon, le numéro de l'arbre, nom vernaculaire, la date de récolte, les informations permettant de localiser l'arbre (coordonnées GPS) et éventuellement les parcelles sur lesquelles ont été collectés les arbres ont été spécifiées.

Arrivés à Antananarivo, les herbiers ont été séchés puis identifiés en consultant les sites de Tropicos et MNHN, et en se référant à « Flore générique des arbres de Madagascar » de George E. Schatz (2001) pour confirmer les noms scientifiques.



Prélèvement d'herbier



Herbiers

Source : Auteur, 2018.

Planche 2 : Herbier

III.4.4. Les paramètres analysés

Les paramètres analysés sont les paramètres relatifs à l'état sanitaire de l'arbre à savoir l'état général de l'arbre (continuité de la croissance, état du houppier et stabilité de l'arbre), la prolifération des agents biologiques de dégradation autour de la blessure (champignons, insectes, larves, etc.), l'évaluation de la cicatrisation de la blessure ainsi que l'évolution de l'état des bouchons utilisés pour reboucher les trous. D'autres données pouvant être reliées à ces paramètres ont aussi été considérées, à savoir l'humidité de la blessure, l'épaisseur de l'écorce des arbres. Chaque arbre dispose d'une fiche individuelle (annexe 1) de suivi et ces différents paramètres y ont été notés, les analyses se font donc arbre par arbre. Pour l'évaluation de ces paramètres, des codifications ou échelles de valeurs ont été mises en place (tableau 3).

- Evolution de la croissance**

La croissance de l'arbre est l'un des paramètres considérés pour analyser l'effet du carottage. Le but étant de vérifier si le carottage a stoppé la croissance de l'arbre, et c'est principalement le diamètre à 1,3 m de hauteur qui a été considéré pour la croissance. Pour cela, la circonférence a été mesurée à 1,3 m de hauteur à l'aide d'un ruban gradué, puis le diamètre a été calculé. Pour les comparaisons, ce sont les diamètres mesurés en 2016 lors du prélèvement des carottes qui sont donc comparés aux diamètres mesurés en 2018, donc 20 mois après.

- **L'état du houppier et la stabilité de l'arbre**

D'une part, la destruction de certains vaisseaux suite au carottage pourrait compromettre le transport des sèves dans certaines parties du houppier entraînant le dessèchement ou la tombée de certaines feuilles et branches. D'autre part, le carottage peut aussi diminuer la stabilité de l'arbre qui pourrait avoir tendance à pencher ou ne pas résister aux vents forts et se casser. Ainsi, ces 2 paramètres ont été considérés. Pour leur évaluation, des échelles de valeurs ont été mises en place. Pour le houppier, le degré varie de 0 à 4 où la valeur 4 indique l'état le plus dégradé avec des feuilles desséchées ou absentes; pour le niveau de stabilité, il varie de 0 à 4 avec 0 l'état de l'arbre le plus stable et bien droit, et 4 correspondant à un arbre coupé par le vent à partir de la partie carottée.

- **Attaque des champignons**

Les champignons sont des organismes aérobies. Les milieux trop secs limitent leur développement et les milieux trop humides ne leur conviennent pas car l'oxygène n'y est plus assez abondant. Normalement, les champignons se développent lorsque la teneur massique en eau dans le bois excède 20 % (Dirol & Deglise, 2001). Dans certains ouvrages, la prévention constructive vise à maintenir le bois à une humidité toujours inférieure à 22% (Trouy, 2016).

Il existe 2 grandes familles de champignons : les Lignivores causant la pourriture fibreuse, la pourriture molle et la pourriture cubique ; et les Lignicoles qui causent la décoloration.

Les étapes des attaques des bois par les champignons sont :

- (i) Degré 1: Le mycélium est microscopique (quelques microns de diamètre pour les filaments), on n'en peut déceler que les amas.
- (ii) Degré 2: Il y a des bleuisslement qui se produit parfois très rapidement dans les piles de bois résineux fraîchement débité, ainsi que dans certaines essences tropicales.
- (iii) Degré 3: Ce sont des altérations plus profondes et plus graves, toujours provoquées, par une aggravation due à des négligences.
- (iv) Degré 4: C'est la dernière étape avant la destruction.

Les termes pourriture rouge, pourriture blanche, pourriture jaune, grisette à chair de poule (taches blanches), grisette à flammes (taches jaunes ou blanches assez grandes), pourriture sèche, carie (pourriture du cœur) ne concernent que l'aspect de l'altération. Ces termes ne correspondent pas à une hiérarchie des altérations.

En addition, selon la méthode d'Edlund *et al.* (2006), des correspondances de la durabilité naturelle du bois, avec un indice de conservation (IC en %) du bois, peuvent être établies. Il s'agit d'une méthode d'évaluation qualitative de la durabilité naturelle se référant à la norme EN 252 (AFNOR,

1989). Des notes de 0 à 4 (annexe 7) ont alors été attribuées pour mesurer le degré d'attaque des champignons (Randrianoely, 2017).

- **Prolifération des insectes et larves**

Il existe différents types d'insectes parasites s'attaquant au bois. La codification des espèces faunistiques sur les blessures dépend de l'état d'envahissement des insectes et macrofaunes. Le degré d'attaque utilisé varie également de 0 à 4 dont la valeur 0 indique l'absence d'attaque et la valeur 4 correspond à un état entièrement envahi par une ou plusieurs espèces parasite(s).

- **Degré d'humidité**

Il s'agit de l'humidité autour de la blessure. L'évaluation de l'humidité est nécessaire car d'après la littérature, la prolifération de certains agents biologiques de dégradation peut dépendre du taux d'humidité. Cette évaluation n'a pas été effectuée à l'aide d'un humidimètre mais par appréciation visuelle de l'humidité en utilisant une échelle de valeurs de 0 à 4 où 4 indique l'humidité maximale.

- **Evolution de la cicatrisation**

Il est nécessaire d'évaluer le degré de cicatrisation de chaque individu pour pouvoir les analyser selon différents paramètres (espèce, diamètre des arbres, etc.).

D'un côté, les arbres possèdent généralement des barrières naturelles qui ont pour objectif de freiner la propagation des micro-organismes, et laisser ainsi le temps à l'arbre de déployer une nouvelle écorce sur la plaie, de rétablir son étanchéité à l'air. Cette étape est la cicatrisation (annexe 6). En effet, suite à une blessure, l'arbre va développer lentement un bourrelet cicatriciel bien connu des arboriculteurs. Ce bourrelet, ou cal, est formé par le cambium (qui permet aussi la greffe des arbres). Il progresse de l'extérieur vers le centre jusqu'à reconstituer une nouvelle écorce (Chailet, 2016).

D'un autre côté, les vaisseaux non obstrués sont des voies de pénétration des agents destructeurs. Le bois est biodégradable et à la mort de l'arbre, il est décomposé par les champignons et la microfaune forestière afin de permettre le recyclage des éléments. Le degré de cicatrisation a ainsi été analysé en utilisant une échelle de 0 à 4 où 4 indique une cicatrisation totale de l'arbre (annexe 13) et 0 l'absence de début de cicatrisation. Le diamètre du trou non encore cicatrisé a aussi été mesuré pour chaque arbre à l'aide d'un metteur ruban.

- **Etat du bouchon**

L'évolution de l'état du bouchon utilisé pour reboucher le trou dans lequel les carottes ont été prélevées a aussi été analysée. Normalement, ces bouchons ont été mis en place pour essayer de limiter les attaques des agents de dégradation, mais dans certains cas, ils peuvent nuire à la cicatrisation de la blessure. Ces bouchons sont constitués par des branches d'arbres, appartenant ou

non à l'espèce de l'arbre à reboucher, et peuvent donc se dégrader. D'où l'intérêt de l'analyse de l'évolution de l'état des bouchons. De plus, on veut aussi savoir si le rebouchage est un facteur limitant de la cicatrisation de l'arbre. Pour évaluer l'état du bouchon, une échelle de valeurs de 0 à 4 indiquant l'état du bouchon a été établie où 4 correspond à un bouchon fortement endommagé (pourri, fortement rétréci).

Les paramètres à considérer pour l'évaluation de l'état du bouchon sont donc la présence ou non du bouchon, son rétréciissement, et le degré d'attaque des champignons ou des autres agents de dégradation.

Le rétréciissement du bouchon peut être dû à de nombreux facteurs, par exemple le retrait du bois. En effet, le bois gonfle en présence d'eau et se rétracte en séchant, cette modification peut être mesurée par le degré d'humidité du bois également appelé le degré d'équilibre hygroscopique. En outre, le rétréciissement peut être causé par d'autres facteurs notamment le degré d'attaque des agents biologiques de dégradation.

Tableau 3: Codification des paramètres analysés

Degré	0	1	2	3	4
Cicatrisation de l'arbre	Pas de cicatrisation	Apparition de bourrelet	Progression de bourrelet visible	Evolution du cal cicatriciel	Cicatrisation terminée
Houppier	Intact	Très peu affecté	Faiblement affecté	Moyennement affecté	Fortement affecté
Stabilité	Stable, droit	Très légèrement penché	Légèrement penché	Moyennement penché	Arbre abattu (non résistance)
Champignon	Aucun	Attaque invisible	Coloration	Echauffures	Pourritures
Insecte/larve	Aucun	Arbre très peu envahi	Arbre peu envahi	Arbre moyennement envahi	Arbre avec des espèces envahisseuses
Humidité	Blessure sèche	Taux d'humidité très faible	Faible humidité	Moyennement humide	Fortement humide
Rétrécissement du bouchon	Pas de rétréciissement	Très peu rétréci (de 1 à 2 mm)	Peu rétréci (de 2 à 4 mm)	Moyennement rétréci (de 4 à 7 mm)	Très rétréci (plus de 7 mm)
Etat du bouchon (par rapport aux attaques des agents de dégradation)	Intact	Très peu endommagé	peu endommagé (peu d'attaque de champignon/insecte, peu de rétréciissement)	moyennement endommagé (attaque de champignon/insecte moyenne, rétréciissement moyen)	Fortement endommagé (pourri, fort rétréciissement)

III.4.5. Analyse et traitement des données

Après les travaux de collecte de données sur terrain, les données ont été compilées puis traitées. Les analyses de variances et de corrélation ont été effectuées à l'aide du tableur Excel.

- Etude de corrélation pour identifier la relation entre les indicateurs**

Des analyses des corrélations entre les différents facteurs ont été effectuées afin de trouver des relations entre ces facteurs (tableau 4). Pour cela, c'est le coefficient de corrélation (R) de Pearson qui a été utilisé. Ce coefficient R sert à quantifier l'intensité et le sens de la dépendance linéaire entre deux variables et sa valeur est comprise entre -1 et 1 (Geffray, 2009). Voici une échelle de valeurs pour l'appréciation de l'intensité de la corrélation :

Tableau 4 : Appréciation de l'intensité de corrélation

Valeurs du coefficient de corrélation R	Intensité de corrélation
[0 ; 0,5 [Absence ou très faible corrélation
[0,5 ; 0,7 [Corrélation faible
[0,7 ; 0,8 [Corrélation modérée
[0,8 ; 0,9 [Corrélation forte
[0,9 ; 1 [Corrélation très forte

Source : Bosquet, 2006

III.4.6. Analyse des arbres coupés

Pour le cas des arbres coupés, aucun paramètre ne peut être analysé. Seule leur capacité de réitération, c'est-à-dire, d'émettre des rejets ont été observés pour évaluer sa stabilité suite aux prélèvements.

III. 5. Cadre opératoire

Le cadre opératoire de l'étude se présente comme suit (tableau 5) :

Tableau 5 : Cadre opératoire

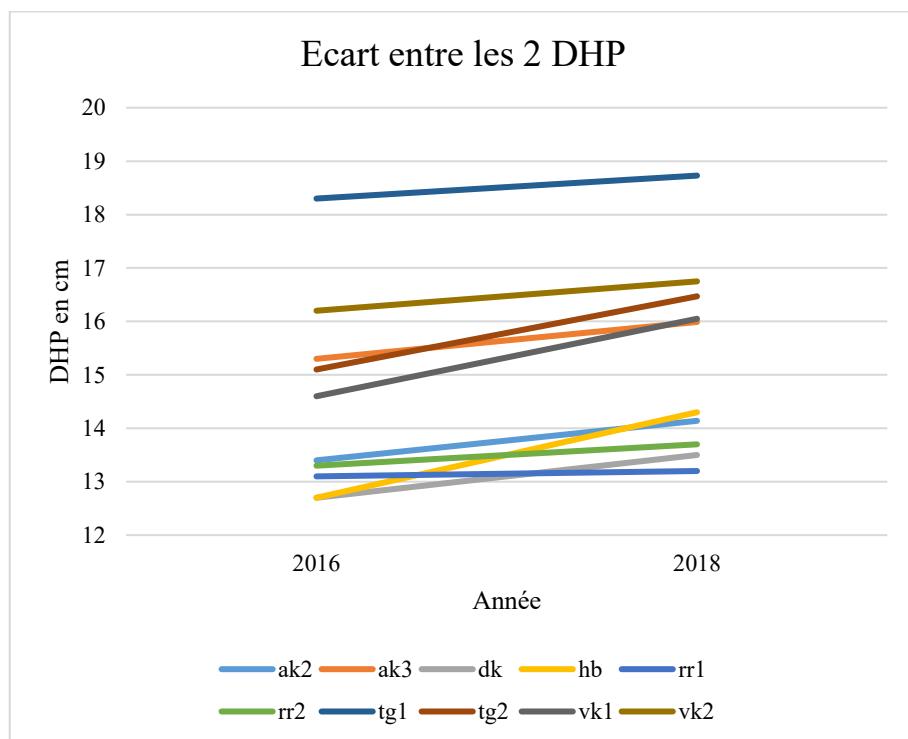
Problématique	Hypothèses	Variables analysées	Indicateurs	Méthodes
Comment la pratique du carottage sur un arbre porte-t-elle atteinte à son état sanitaire ?	<p>Le prélèvement d'une carotte de bois sur un arbre n'a pas arrêté sa croissance.</p> <p>La prolifération des agents biologiques de dégradation autour de la blessure et la cicatrisation de l'arbre dépend de l'espèce de l'arbre</p>	<p>La différence entre les diamètres et l'état général des arbres en 2016 et en 2018.</p> <p>La résistance contre les champignons et les insectes de l'arbre.</p>	<p>Le DHP, l'état du houppier, la stabilité de l'arbre.</p> <p>- Degré d'attaque des agents de dégradations - Degré de cicatrisation</p>	<p>Mesure du DHP et évaluation de l'état général de chaque individu.</p> <p>Observations des arbres sur les lieux.</p>

IV. Résultats et interprétations

IV.1. Effet du carottage sur la croissance, l'état du houppier et la stabilité de l'arbre

IV.1.1. Effet sur la croissance de l'arbre

L'évaluation de la croissance des arbres en diamètre concerne l'écart entre le DHP mesuré lors du carottage en 2016 et de DHP dernièrement mesuré en 2018 (figure 3). Parmi les 12 individus, 10 ont été analysés sur la croissance en diamètre parce que les noms scientifiques de deux individus (tsopatika et aferonakavy 1) n'ont pas été clairement identifiés et aucune note prélevée en 2016 ne correspond à leurs noms scientifiques. Ainsi, les écarts entre le DHP initial et le DHP après le carottage pour les 10 arbres varient entre 0,1 et 1,6 cm (annexe 2), le DHP de tous les arbres analysés a augmenté.



Ak : aferonakavy ; dk : dodoka ; hb : hazoambo ; rr : hazondrahahara ; tg : tsilongodongotra ; vk : voantsilaka

Source : Auteur, 2018.

Figure 3 : Ecart entre les deux diamètres mesurés en 2016 et en 2018

Le paramètre hauteur n'a pas été considéré car la précision de son estimation ne permet pas de faire la différence entre 20 mois de croissance sur des arbres matures. Donc, seul le DHP a été analysé.

IV.1.2. Effet sur le houppier

Comme évoquée plus haut, la codification de l'état du houppier varie de 0 à 4 où la valeur 0 indique un état du houppier intact (absence de dessèchement des feuilles ou absence de

défoliation). Sur tous les individus analysés, trois n'ont pas un houppier dont une partie des feuilles groupées sont desséchées ou absentes et donc avec une codification de 0 (planche 3).



Tsopatika



Voantsilaka 1



Tsilongodongotra 2

Source : Auteur, 2018.

Planche 3 : Houppiers intacts

Néanmoins, pour certains individus comme sur le « dodoka », les deux « hazondrahara » et « aferonakavy 2 », « hazoambo » et « tsilongodongotra 1 » (planche 4), le houppier n'est pas bien symétrique si bien qu'on peut avoir tendance à donner une codification de 1 (il n'y a pas de présence de feuilles desséchées, mais des branches sans feuilles). Mais cela peut ne pas être dû à l'effet du carottage puisque les valeurs H de l'index PHF donné à ces arbres lors du prélèvement des carottes en 2016 ne sont déjà pas très bonnes. De plus, ces arbres avec une code 1 sont principalement des arbres isolés, ou dont la hauteur est assez haut par rapport à ses voisins si bien qu'ils subissent plus l'effet du vent et peuvent perdre plus de feuilles surtout suite au passage du cyclone AVA en janvier 2018 dernier.

En outre, d'autres individus comme l' « aferonakavy 1 » et le « voantsilaka 2 » ont un degré de dégradation du houppier de niveau 3 soit seulement 70% du houppier ont des feuilles. L' « aferonakavy 3 » a été coupé à 1,60 m du sol (exploitation illicite), l'état du houppier ne peut alors être évalué. Néanmoins, il a rejeté des souches.



Tsilongodongotra 1



Dodoka



Hazondrahara 2



Aferonakavy 1

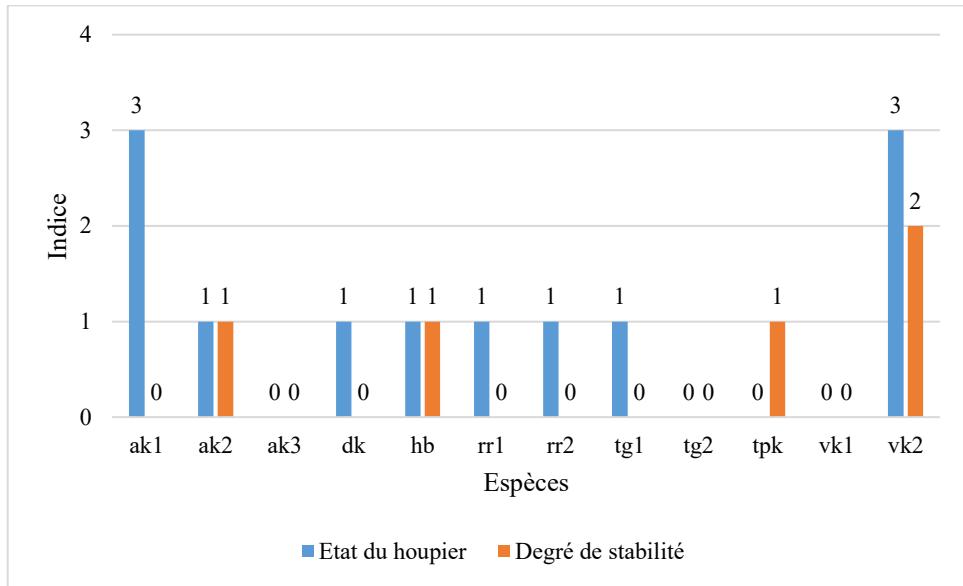
Source : Auteur, 2018.

Planche 4 : Houppiers partiellement incomplets

IV.1.3. Effet sur la stabilité de l'arbre

Pour chaque individu, le niveau de stabilité de chaque individu varie de 0 à 2 (figure 4). Parmi les onze (11) arbres sur pied, huit ont un degré de stabilité 0, c'est-à-dire, les arbres sont stables et bien

droit. Trois individus ont un degré de stabilité 1, très légèrement penchés et seul le « voantsilaka 2 » a un degré de stabilité 2, légèrement penché. Mais cela peut ne pas être lié au carottage puisque ces arbres sont déjà penchés même avant le carottage étant donné leur index PHF.



ak : *aferonakavy*, dk : *dodoka*, hb : *hazoambo*, rr : *hazondraharaha*, tg : *tsilongodongotra*, tpk : *tsopatika*, vk : *voantsilaka*.

Source : Auteur, 2018.

Figure 4 : Etat du houppier et stabilité des individus

IV.2. Prolifération des agents biologiques de dégradations autour de la blessure

IV.2. 1. Prolifération des champignons

Le calcul de l'analyse de variance montre que le facteur espèce influence significativement la prolifération des champignons sur l'aubier au seuil de 15% et sur l'écorce au seuil de 10%. Les principaux champignons qui attaquent l'aubier sont des champignons causant des pourritures brunes et blanches.

Sur les 12 individus analysés, 3 individus dont « tsopatika », « tsilongodongotra 1 » et « aferonakavy 3 » n'ont pas été attaquées par les champignons sur chacun des 2 côtés de la blessure, que ce soit sur l'écorce ou l'aubier. Pour d'autres individus, ils sont attaqués en partie, c'est-à-dire soit seulement au niveau des écorces comme pour le cas du « hazondraharaha 2 », ou seulement au niveau de l'aubier comme le cas du « aferonakavy 1 », du « voantsilaka 1 » et du « voantsilaka 2 ». Le degré d'attaque des champignons sur les écorces est qualifié de degré 1. C'est-à-dire que le mycélium est microscopique soit quelques microns de diamètre pour les filaments, et seule la présence des amas a été décelée. Il s'agit de champignons lignicoles qui causent une légère décoloration (bleuisslement ou noircissement) de l'écorce sans engendrer une dégradation.

Pour les 5 individus restants, ils sont attaqués à la fois sur l'écorce et sur l'aubier avec des degrés d'attaque différents selon l'individu. Le degré d'attaque varie de 1 à 4, où l'aubier est toujours plus dégradé que les écorces pour toutes les espèces.

Sur l'écorce, l'attaque est visible extérieurement, ce sont des échauffures avec des colorations sous forme de taches blanches et brunes, des bleuissements et des verdissements. Dans d'autres cas comme pour le « aferonakavy » et le « hazoambo », ce sont principalement des pourritures parce que l'attaque est plus accentuée et plus profonde, donc de degré 3. Il s'agit d'une phase de désintégration des parois cellulaires. Pour le cas du « hazondrahahara 1 », le degré d'attaque sur l'écorce est de 2 tandis que sur l'aubier, il est évalué à 3. De même pour l'aubier du « tsilongodongotra 2 » mais le degré d'attaque sur l'écorce est de 1 qui indique une simple décoloration (planche 5).

Parmi tous les individus, le « dodoka » est le plus attaqué par les champignons avec un degré d'attaque de niveau 4 que ce soit sur l'aubier uniquement. L'arbre a subi une des modifications profondes de sa composition chimique, des formations de fructification des champignons sont observées.



Tsopatika



Tsilongodondotra 1



Aferonakavy 3



Hazondrahahara 2



Aferonakavy 1



Voantsilaka 1



Voantsilaka 2



Aferonakavy 2



Hazoambo



Hazondrahahara 1



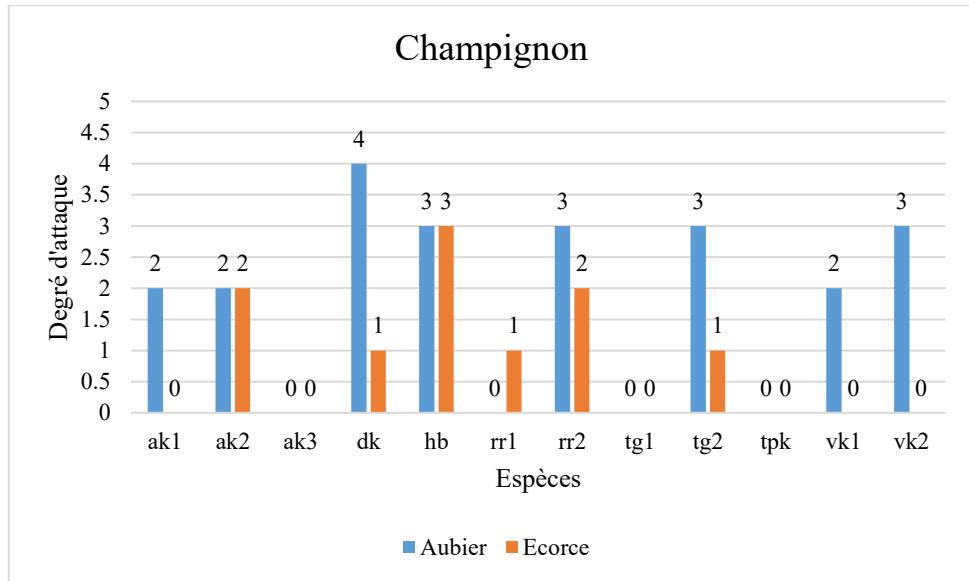
Tsilongodongotra 2



Dodoka

Source : Auteur, 2018.

Planche 5 : Attaque des champignons



ak : aferonakavy, dk : dodoka, hb : hazoambo, rr : hazondraharaha, tg : tsilongodongotra, tpk : tsopatika, vk : voantsilaka.

Source : Auteur, 2018.

Figure 5 : Degré d'attaque des champignons

IV.2. 2. Prolifération des insectes/larves

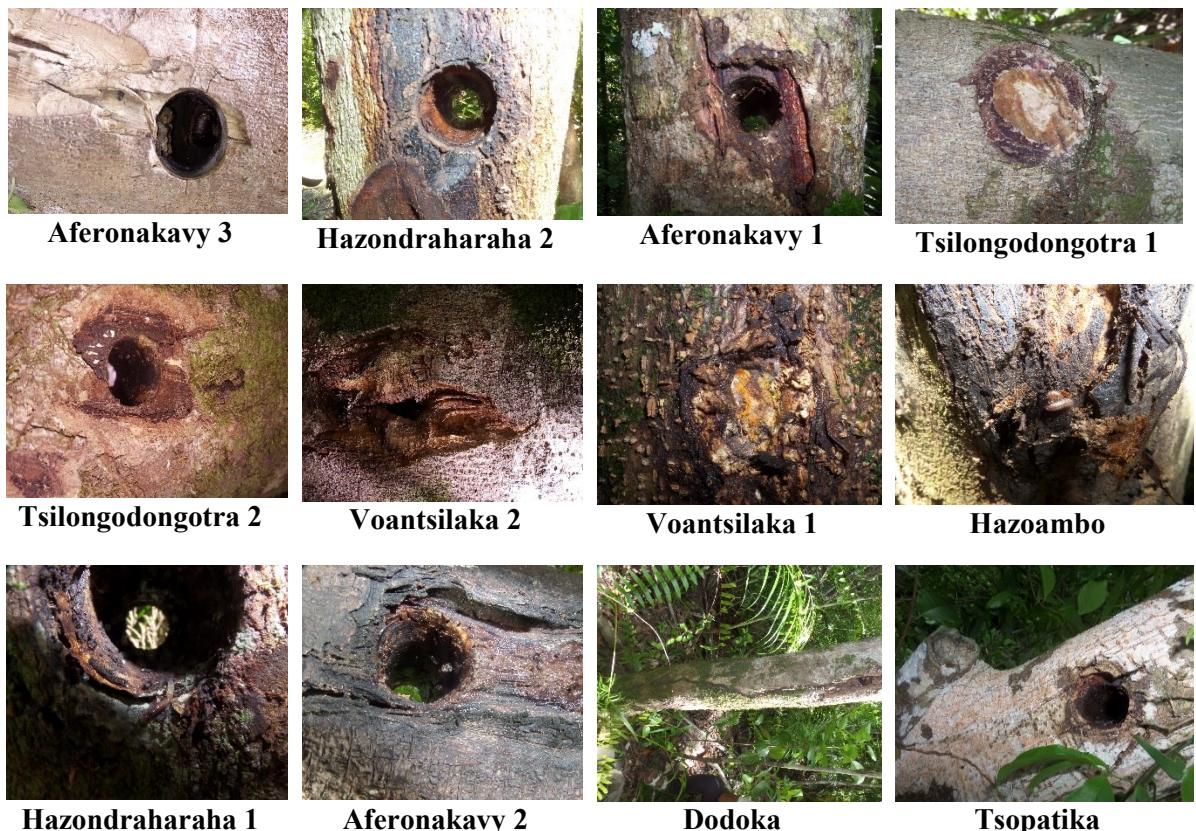
L'échelle de valeurs pour quantifier le degré d'attaque des insectes et larves varie de 0 à 4 où 0 indique l'absence d'attaque. Sur l'écorce des 12 individus, le degré d'attaque varie de 0 à 2 tandis que sur l'aubier, il atteint la valeur de 4 (figure 6) même si les trous ont été rebouchés par des branches de bois. Le facteur espèce influence significativement la prolifération des insectes/larves sur l'aubier au seuil de 30% et sur l'écorce au seuil de 10%.

Le degré d'attaque le plus élevé pour l'écorce concerne celui sur « aferonakavy 3 », dodoka et tsopatika ont un degré 2 ; et pour l'aubier, ce sont les « aferonakavy 3 », « hazondraharaha 2 » et « tsopatika » avec des degrés de 3 à 4. Les individus avec des degrés d'attaque nulle concernent « hazondraharaha 2 », « aferonakavy 1 » et « tsilongodongotra 1 », que ce soit sur l'écorce ou sur l'aubier (absence d'attaque). Néanmoins, il y a des individus dont l'écorce a été dégradée (degré 1) et non l'aubier (degré 0) comme le « hazoambo » et « voantsilaka 2 ». Et il y a aussi des individus dont l'aubier seulement est attaqué et non l'écorce comme le « tsilongodongotra 2 » ou le « voantsilaka 2 » (planche 6).

C'est principalement la présence de petits insectes comme les lyctus (coléoptères xylophages de la famille des Lyctinae dont les larves vivent dans l'aubier) et des fourmis qui a été observée. Mais il y a aussi la présence d'autres animaux, dont certains ne sont pas xylophages, comme les mollusques, les mille pattes, des vers et même des araignées qui étaient leur toile couverte d'œufs

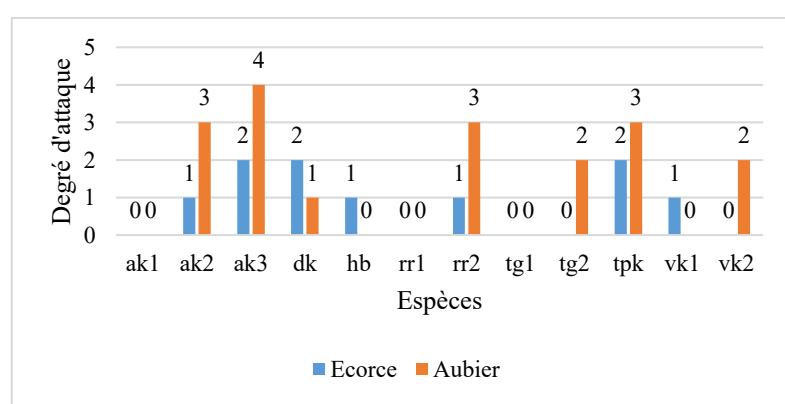
sur l'écorce. Ces derniers sont principalement attirés par les insectes et larves xylophages se trouvant sur la blessure.

Pour certains individus (« hazoambo » ou « voantsilaka 1 »), les observations sont superficielles parce qu'il était impossible d'enlever le bouchon du trou à cause de la cicatrisation déjà avancée.



Source : Auteur, 2018.

Planche 6 : Attaque des insectes/larves



ak : aferonakavy, dk : dodoka, hb : hazoambo, rr : hazondrahara, tg : tsilongodongotra, tpk : tsopatika, vk : voantsilaka.

Source : Auteur, 2018.

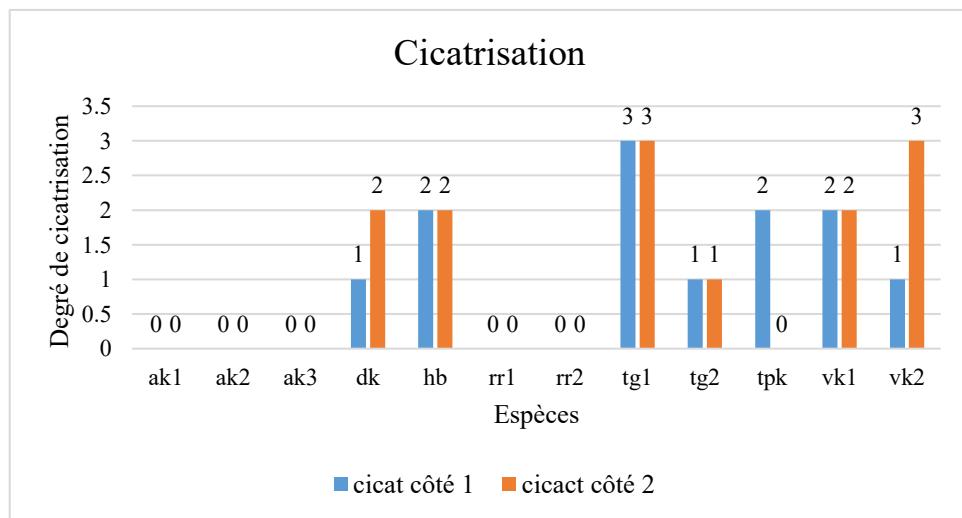
Figure 6 : Attaque des insectes/larves

IV.3. Degré de cicatrisation

Comme le prélèvement des carottes traverse entièrement l'arbre de part et d'autre (écorce-moelle-écorce), le degré de cicatrisation peut ne pas être le même des deux côtés. De plus, les facteurs accélérant ou inhibant la cicatrisation diffèrent selon l'emplacement et l'orientation du trou. L'indicateur du degré de cicatrisation de chaque individu est l'épaisseur du bourrelet cicatriciel, sans oublier la codification du degré de cicatrisation établie préalablement. Ici, le degré de cicatrisation des arbres varie de 0 à 3 pour les 20 mois de cicatrisation. Le degré de cicatrisation varie significativement d'une espèce à une autre au seuil de 5%.

Tous les individus appartenant à 2 espèces dont « aferonakavy » et « hazondrahahara » (5 individus) ont un degré de cicatrisation 0, autrement dit, la cicatrisation n'a pas commencé dans chacun des 2 côtés de l'arbre (planche 7, figure 7). Les espèces qui ont le plus avancé stade de cicatrisation sont le « tsilongodongotra » et « voantsilaka » sur lesquels seulement 8 mm du trou n'est pas recouvert par le cal cicatriciel avec un degré de cicatrisation 3, suivi du « hazoambo » qui a un degré de cicatrisation 2 et où la partie du trou non cicatrisé a un diamètre de 1 cm. Pour les individus qui ont un degré de cicatrisation 1 comme le « tsilongodongotra 2 », la largeur du bourrelet cicatriciel est de 2 mm, le reste non cicatrisé mesure donc 2,3 cm.

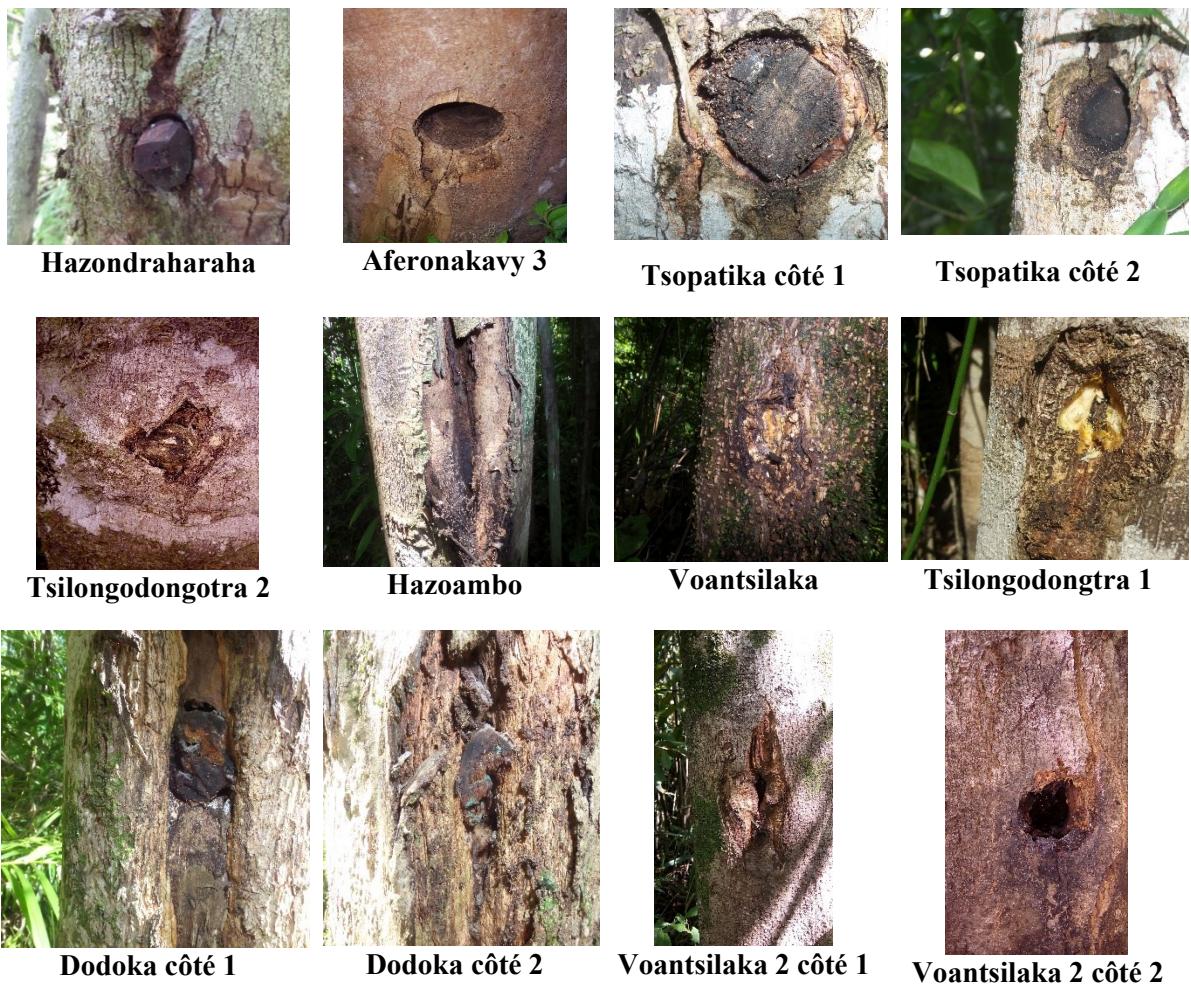
Le degré de cicatrisation des deux côtés d'un même individu n'est pas forcément le même. Le degré de cicatrisation dans un côté peut être plus avancé par rapport à l'autre. C'est le cas du « tsopatika » sur lequel seule la blessure dans un côté de l'arbre a commencé à cicatriser. Pour cet individu, sur l'écorce se trouve un bourrelet visible en progression avec une épaisseur de 3 mm (il reste donc 2,2 cm de diamètre à cicatriser) et un degré de cicatrisation de 2 pour un côté, alors que pour l'autre côté, le degré de cicatrisation est encore 0.



cicat : degré de cicatrisation, ak : aferonakavy, dk : dodoka, hb : hazoambo, rr : hazondrahahara, tg : tsilongodongotra, tpk : tsopatika, vk : voantsilaka.

Source : Auteur, 2018.

Figure 7 : Degré de cicatrisation après 20 mois



Source : Auteur, 2018.

Planche 7 : Evolution de la cicatrisation des blessures à 20 mois

IV.4. Etat des bouchons

Comme évoqués dans la partie méthodologie, les paramètres à considérer pour l'évaluation de l'état du bouchon sont la présence ou non du bouchon, son rétrécissement, et le degré d'attaque des champignons ou des autres agents de dégradation.

Pour tous les arbres sur pied, tous les bouchons sont encore présents, seuls les rétrécissements des bouchons et les degrés d'attaque diffèrent entre les individus. Pour les 12 individus, le degré de rétrécissement des bouchons varie de 0 à 3, et le degré d'attaque des agents de dégradation sur le bouchon varie de 0 à 4 sur une échelle de 0 à 4 (planche 8, figure 8). Généralement, il y a une corrélation positive entre degré d'attaque des bouchons (état) et rétrécissement de leur taille en diamètre. Le rétrécissement du bouchon est principalement dû aux agents biologiques qui dégradent le bois mais également à cause de l'évolution de la cicatrisation.

Parmi eux, les bouchons de quatre d'entre eux n'ont pas rétréci (figure 8). La taille, c'est-à-dire, le diamètre du bouchon est resté le même depuis le carottage. Il s'agit du « hazondraharaha 2 », du

« hazoambo », du « voantsilaka 1 » et du « tsilongodongotra 1 ». Pour le cas des bouchons du « aferonakavy 2 », du « tsilongodongotra 2 » ou du « tsopatika », un rétrécissement de 1 mm a été observé correspondant à un rétrécissement de degré 1. Le premier cas est expliqué par l'état du bouchon par rapport aux attaques des insectes et par rapport à la quantité d'eau sur la partie carottée. En effet, sur le « aferonakavy 2 », le bouchon pouvait être facilement enlevé.

De leur côté, les bouchons du « hazondrahahara 1 », du « aferonakavy 1 » et du « dodoka » ont eu un rétrécissement de degré 2, avec respectivement un rétrécissement de 6 mm en diamètre, un rétrécissement de près du tiers du diamètre du bouchon et un rétrécissement de 7 mm en diamètre. Les deux individus restants (« voantsilaka 2 » et « aferonakavy 3 ») ont un rétrécissement de degré 3 où la moitié du bouchon est dégradée ou a rétréci, principalement à cause de la quantité d'eau élevée et l'attaque des champignons et insectes.

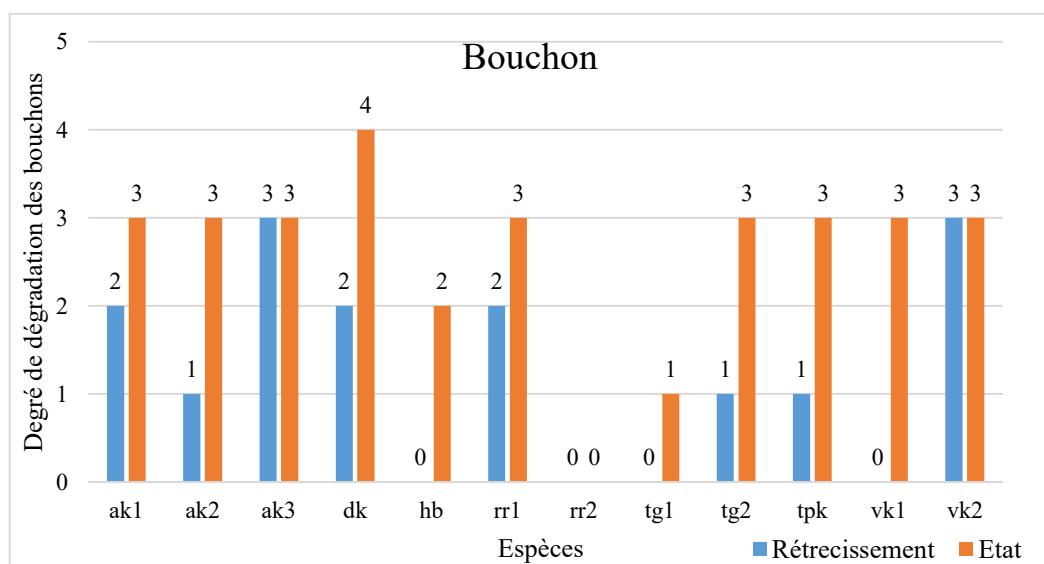
Le degré d'attaque des bouchons a été évalué de 0 à 4 en tenant compte de l'attaque des champignons, des insectes et des autres agents de dégradation ou des agents qui attirent les xylophages (araignées, milles pattes, etc.). L'échelle de valeurs pour codifier le degré d'attaque des champignons est la même, établie dans le tableau de codification, pour le bouchon. Sur les 12 individus, seul le bouchon du « hazondrahahara 2 » a un degré d'attaque nul malgré la légère décoloration sur les bouts et l'humidité aux extrémités. Puis, pour le cas du bouchon du « tsilongodongotra 1 », le degré d'attaque a été estimé à 1 à cause de l'attaque de champignon qui a causé une décoloration noire du bouchon observé sur le bout d'un côté seulement. Le bouchon du « hazoambo » est attaqué à un niveau 2 à cause des champignons observés. En outre, les bouchons de 8 individus ont un degré d'attaque de niveau 3, qui est dû (i) soit par les attaques des insectes et des larves comme pour le cas des bouchons du « tsopatika », du « aferonakavy 2 » et du « aferonakavy 3 » ; (ii) soit par l'attaque des champignons éventuellement accentuée par la quantité d'eau sur la partie carottée comme pour le cas des bouchons du « hazondrahahara 1 », du « aferonakavy 1 » et du « voantsilaka 1 » ; (iii) soit par les deux comme pour le cas du « tsilongodongotra 2 » et du « voantsilaka 2 ». Finalement, le bouchon du « dodoka » est attaqué à un niveau 4 par les champignons qui sont passés à la fructification et dégradent considérablement le bouchon.

L'état du bouchon des 12 individus est généralement dégradé que ce soit à cause de l'évolution du cal cicatriciel, de la quantité d'eau ou des attaques des agents de dégradation. Seulement 30% des individus ont gardé la taille, c'est-à-dire, le diamètre du bouchon initial. De plus, 65% des individus sont attaqués à un niveau 3, sur une échelle de 0 à 4, par les agents de dégradation.



Source : Auteur, 2018.

Planche 8 : Etat des bouchons



ak : aferonakavy, dk : dodoka, hb : hazoambo, rr : hazondrahara, tg : tsilongodongotra, tpk : tsopatika, vk : voantsilaka.

Source : Auteur, 2018.

Figure 8 : Evolution de l'état des bouchons

IV.5. Cas particuliers : analyse des arbres coupés illicitement à la hache

Pour le cas des arbres coupés, 8 individus sur 10 émettent des rejets de souche. Les deux individus qui n'ont pas émis des rejets sont des « tsifo ». Les rejets de souche indiquent que l'arbre a repris sa croissance. En effet, un rejet est une nouvelle pousse apparaissant sur une plante suite à un traumatisme : à la suite de la coupe du tronc de l'arbre par exemple. L'arbre présente alors un déséquilibre entre sa masse racinaire et sa masse aérienne qu'il compense en émettant les rejets nécessaires au retour à l'équilibre. Et sur les surfaces coupés (plan R-T) des arbres ne figurent que peu d'attaque d'agents de dégradation, voire aucune pour certains, probablement à cause de la faible humidité sur cette surface.

V. Discussions et recommandations

V.1. Discussions

V.1.1. Discussion sur la méthodologie

❖ Les individus analysés

Initialement, il était prévu que cette étude se base sur 30 individus, mais seulement 22 ont été retrouvés dont 10 ont été coupés. L'étude se limite ainsi sur les 12 individus restants. Le nombre d'individus utilisé dans cette étude figure parmi les limites dans cette étude. En effet, ce nombre d'individus est assez faible, de plus chaque espèce n'est représentée que par un ou deux individus. En somme, les résultats analysés ne sont que des résultats de 20 mois, et peuvent être considérés comme des résultats préliminaires, l'idéal étant d'analyser des résultats de plus de 2 ans au moins. Néanmoins, cela dépend de la taille de la blessure à cicatriser parce que la rapidité d'accroissement du bourrelet dépend de la vigueur de la partie de l'arbre blessée et de la forme de la blessure (Ministère de l'Agriculture, 2010).

❖ Méthode d'évaluation de l'état de l'arbre

Les critères utilisés pour évaluer l'état sanitaire de chaque individu sont la croissance par mesure directe de la circonférence, l'état du houppier (éventuelle existence d'une partie de houppier dégradée c'est-à-dire des branches n'ayant plus de feuilles ou avec des feuilles séchées) et la stabilité de l'arbre, la prolifération d'agents biologiques d'altération (champignons, insectes, larves, etc.), le niveau de cicatrisation, l'état du bouchon ainsi que certains paramètres qui pourraient expliquer l'état sanitaire de l'arbre comme l'humidité autour de la blessure et l'épaisseur de l'écorce. La croissance en hauteur n'a pas été analysée car elle a été obtenue par estimation visuelle et non par mesure directe si bien qu'il peut y avoir des erreurs d'estimation et qu'on ne pourra pas par la suite comparer la hauteur obtenue lors du carottage et la hauteur obtenue 20 mois après puisque cet intervalle de temps ne suffit pas pour une comparaison.

Basée sur la méthode V.T.A de Claus Mattheck (2006), l'appréciation complète de la santé d'un arbre suit différentes étapes plus complexes et plus approfondies nécessitant des appareils sophistiqués et pendant une durée plus longue. Les 3 étapes à suivre pour cela sont les suivantes :

- Le diagnostic physiologique pour évaluer l'état de fonctionnement des différents organes de l'arbre et leur faculté de réaction à un éventuel stress. Cet examen a pour but d'apprécier la vitalité et la vigueur de l'arbre à partir de certaines observations : longueur des pousses annuelles, capacité de réitération (rejets), densité de feuillage, dynamisme des cals cicatriciels, descente de cime, etc. Il permet par exemple d'évaluer la gravité d'un dépérissement, l'espérance de maintien de l'arbre dans un état sécuritaire acceptable, la reprise des plantations récentes.

- Le diagnostic sanitaire : permettant d'identifier par leurs symptômes, des affections pathologiques d'origine biotique (insectes, maladies, champignons, ...) ou abiotique (asphyxie, intoxication,...) en jugeant de leurs conséquences. Pour le cas des champignons, les lignivores sont recherchés soit par la présence de leurs fructifications soit par leurs symptômes (chancre, pourriture, etc.). Leur identification permet d'appréhender l'évolution du défaut, en fonction du pouvoir lignivore du champignon (rapidité d'évolution de la pourriture), du degré de parasitisme (comportement parasite/saprophyte) et des zones du bois colonisées (écorce, aubier, duramen).

- Le diagnostic mécanique : pour déterminer l'état de solidité des différentes parties de l'arbre à partir de la recherche de défauts pouvant entraîner des fragilités et être à l'origine de la rupture des structures. Tous les défauts majeurs observés sont relevés en indiquant leur localisation, leur importance, leur gravité au regard des seuils de risque de rupture et leur tendance évolutive.

Lorsque le premier niveau d'expertise visuelle et acoustique n'est pas suffisant pour juger de l'importance d'un défaut, un complément d'analyse peut être réalisé par sondage au pénétromètre de la partie portant le défaut avéré ou suspecté (généralement altération ou cavité interne). Ces sondages par perçage permettent de déterminer l'étendue des cavités et de mesurer l'épaisseur de la paroi résiduelle de bois sain, de déterminer et de quantifier la présence d'écorce incluse, de confirmer la présence de fissures internes et enfin de déterminer l'étendue des attaques de champignons lignivores (Mejean, 2010).

Après, un examen approfondi est à réaliser pour affiner l'examen visuel et estimer les risques de rupture mécanique pour déterminer le mode de gestion le plus adapté destiné à l'arbre étudié. La faisabilité de ces méthodes à Madagascar requiert des appareils coûteux, du temps et des spécialistes dans chaque domaine d'étude (pour chaque paramètre étudié). La présente étude se limite en une observation plutôt superficielle de l'état général de l'arbre après le carottage.

❖ **Etablissement des échelles de valeurs (codification) pour quantifier l'intensité des différents facteurs analysés**

La codification des degrés des facteurs utilisés pour caractériser l'état de l'arbre se situe entre 0 et 4. Ces échelles de valeurs ne sont pas très différentes des autres échelles de valeurs existantes dans la littérature. Exemple, dans cette étude, la codification pour la prolifération des agents biologiques de dégradation (champignon/insecte/larve) est de 0 à 4, et parallèlement à cela, l'indice de conservation d'Edlund *et al.* (2006) a une échelle de valeurs de 0 à 4 où la valeur 0 correspond à une très forte durabilité naturelle et la valeur 4 à une non-durabilité naturelle.

Pour le cas du houppier, la codification de l'état du houppier utilisée dans ce travail varie de 0 à 4 (5 niveaux), et parallèlement à cela, la valeur du facteur H dans l'index PHF qui est très utilisé en sylviculture varie de 1 à 5 (5 niveaux également). En effet, les perturbations d'un arbre se reflètent sur l'état général du houppier (Landmann, 1988).

V.1.2. Discussion sur les résultats

❖ Croissance en diamètre, état du houppier et stabilité de l'arbre

La croissance moyenne en diamètre obtenue est de 0,49 cm/an, cela correspond à la moitié de la croissance moyenne en diamètre dans les forêts naturelles qui est de 1 à 2 cm/an (Dawkins, 1963). Cela montre que le carottage n'a pas arrêté la croissance de l'arbre, mais des études plus poussées devraient être menées.

Pour l'état du houppier, c'est un indicateur important dans l'évaluation de l'état sanitaire de l'arbre. En effet, outre les changements dans la croissance des arbres et les mortalités « anormales » dans les peuplements forestiers, le signe de baisse de vitalité le plus souvent cité est la présence de symptômes « inhabituels » au niveau du houppier. La détection de ces perturbations suppose des connaissances précises sur l'aspect « normal » des houppiers dans des conditions écologiques données. L'aspect des arbres et leur croissance sont des « manifestations » synthétiques de la vitalité, et à ce titre, leur connaissance est essentielle (Landmann, 1988). Dans cette étude, aucun houppier ne présente de groupe de feuilles desséchées. L'existence d'éventuelle partie du houppier ne présentant pas de feuilles peut être due à plusieurs raisons comme le passage du cyclone en janvier 2018 dernier. Certains de ces arbres ont même des houppiers déjà mal-conformés même avant le prélèvement des carottes.

Par ailleurs, l'idée de la sectorialité des vaisseaux irriguant une partie définie du houppier n'est pas fondée (Zanne *et al.*, 2006). En effet, les vaisseaux d'un arbre sont largement enchevêtrés entre eux qu'en cas de blessures dans une certaine partie, la sève brute ou élaborée n'a aucun mal à trouver un autre chemin pour arriver dans les différentes parties de l'arbre.

Concernant la stabilité des arbres, tous les arbres sont biens droits même si quatre individus semblent légèrement penchés ce qui n'est pas dû au carottage d'après le paramètre F (fût) de l'index PHF prélevé en 2016. Cela peut être dû au fait que les carottes n'ont été prélevées que sur les arbres ayant un DHP supérieur à 8 cm pour limiter les éventuels effets négatifs du carottage.

Pour le cas des arbres coupés illicitement, la survie et la poursuite de la croissance sont expliquées par l'émission des rejets. En effet, la capacité de réitération, c'est-à-dire d'émettre des rejets détermine l'état de fonctionnement des différents organes de l'arbre et leur faculté de réaction face à des stress comme l'abattage (Mejean, 2010).

❖ Attaque des agents de dégradation, humidité (face sous soleil) et cicatrisation

Le degré de prolifération des champignons peut varier selon l'espèce. L'humidité est également un facteur qui intervient à priori dans la dégradation du bois. En effet, l'humidité du bois influence la prolifération des champignons à un taux élevé de 20 à 22 %. La blessure de certains arbres est moins humide que d'autres et donc moins propice aux champignons. Néanmoins, l'exposition de la blessure au rayon du soleil peut aussi influencer la prolifération des champignons, ce qui pourrait être à l'origine de la différence de cicatrisation des blessures dans les 2 côtés de l'arbre. Un autre facteur lié à la différence de prolifération des champignons par espèce est aussi la durabilité naturelle des arbres qui est à la fois liée à la densité et aux extractibles du bois (Jebrane *et al.*, 2014). Cette durabilité naturelle est définie comme étant la capacité du bois à résister aux attaques des agents biologiques de dégradation du bois. En effet, la résistance des espèces diffère selon la disposition des éléments chimiques dans le bois. Pour une même quantité d'extractible dans le bois, la nature des extractibles influence également sa résistance aux champignons, et ces paramètres n'ont pas été étudiés faute d'équipement, de temps et de moyens financiers.

Les indicateurs « épaisseur de l'écorce » et DHP participent également dans la protection de l'arbre contre les principaux agents de dégradation et dans la résistance mécanique de l'arbre (Sau, 1997).

❖ Corrélations entre les différents caractères

Des études de corrélations (annexe 8) par calcul des coefficients de corrélation entre les différents caractères ont été effectuées pour déceler l'existence d'éventuelle corrélation entre les caractères. Un coefficient nul ou proche de 0 signifiant une absence ou une faible corrélation entre les deux variables, et un coefficient proche de 1 ou -1 signifie une forte corrélation. Outre certains caractères déjà analysés plus haut, d'autres variables ont aussi été considérées comme les valeurs de durabilité naturelle de ces espèces établies par Rakotovao *et al.* (2012), les valeurs de densité à 12% (Rakotovao *et al.*, 2012 ; ITTO, 1988) (annexe 9).

Sur les propriétés qui sont intéressantes dans cette étude (annexe 11) :

- Pour le degré de cicatrisation, les variables qui sont les plus corrélées avec lui sont l'état du houppier ($R = -0,406$), le DHP ($R=0,285$), le degré d'attaque des insectes ($R=0,405$) et l'épaisseur de l'écorce ($R=0,206$). Ainsi, moins il y a d'attaques de champignon, ou plus l'épaisseur de l'écorce est élevée, plus la cicatrisation est avancée en raison de la présence de cambium producteur de cellules dans l'écorce.

- Pour le degré d'attaque des champignons, les variables qui sont les plus corrélées avec lui sont l'état du bouchon ($R=0,133$), eau($R=0,316$), la stabilité. ($R=0,453$). Le plus corrélé est donc l'humidité, ainsi plus la partie carottée est humide, plus les champignons se développent.

Pour l'état du bouchon (annexe 10), les variables les plus corrélées sont l'envahissement des champignons ($R=0,133$), des insectes ($R=0,557$) et la densité du bois ($R=-0,276$). Ainsi, ce sont les insectes qui sont les principales causes de détérioration du bouchon. Boucher le trou après carottage pourrait favoriser en partie la dégradation de la partie carottée en favorisant l'infiltration des champignons par exemple (Meyer et Hayward, 1936). De plus, dans la littérature, le consensus général est que la guérison a été la plus satisfaisante lorsque les trous ont été laissés nus. Cependant, répéter des sondages, même des années à part, a un effet cumulatif (Jozsa, 1988).

❖ Le carottage en général

Dans le contexte de la recherche où la valeur des arbres vivants soumis à une investigation dendrochronologique est importante, l'utilisation d'un carottier pour extraire le tissu du tronc est considérée comme la meilleure option pour minimiser les impacts négatifs sur la santé des arbres (stress et forme). Cependant, des littératures rapportent des séquelles significatives, voire mortelles, de cette technique d'échantillonnage. À l'heure actuelle, la littérature documentant les impacts de forage d'incrément (IBC) manque de cohérence expérimentale et est mal reproduite, ce qui rend difficile la méthode d'évaluer les réponses probables des arbres au carottage. Cette rareté de l'information peut conduire à une mauvaise utilisation destructive de la méthode et limite également sa mise en œuvre en toute sécurité dans des circonstances où le risque d'impacts peut être approprié. De plus, aucun traitement universel n'a été identifié qui a définitivement amélioré la cicatrisation des plaies et peu d'études ont lié les réponses de la plaie aux impacts sur la santé des arbres. Par rapport aux résultats, une fermeture complète de la plaie cambiale pouvait encore présenter des taux élevés de pourriture interne du tronc et que les conditions favorisant une croissance plus rapide étaient généralement corrélées avec des indices réduits de dommages internes et externes (Edward *et al.*, 2015).

V.1.3. Vérification des hypothèses

❖ La première hypothèse affirme que « **Le prélèvement d'une carotte de bois sur un arbre n'a pas arrêté sa croissance.** » Les résultats de l'étude ont montré que les écarts entre les deux diamètres mesurés 20 mois après carottage et lors du carottage pour les dix arbres étudiés sont strictement positifs. La croissance de l'arbre ne s'est donc pas arrêtée. De plus, sur une échelle de 0 à 6, 35% des individus ont un houppier parfaitement intact, 35 % ont été touché en partie (degré 1), 15 % ont un houppier plus ou moins affecté (degré 2) et 15% ont un houppier assez affecté (degré

3). Pour les arbres coupés, 8 individus sur 10 ont émis des rejets. Ainsi, il convient de dire que la première hypothèse est vérifiée.

❖ La deuxième hypothèse stipule que « **La prolifération des agents biologiques de dégradation autour de la blessure et la cicatrisation de l'arbre dépend de l'espèce de l'arbre.**» Les résultats montrent que le degré d'attaque des agents de dégradation n'est différent significativement pour chaque espèce qu'au seuil de 15% pour l'aubier et 10% pour l'écorce. Néanmoins, pour le degré de cicatrisation, la différence par espèce est hautement significative au seuil de 5%. D'autres paramètres pouvant influencer le degré d'attaque des champignons ont été évoqués précédemment comme l'état du bouchon, la stabilité de l'arbre et l'humidité. A l'issu de ces résultats, la deuxième hypothèse est donc partiellement vérifiée.

V.2. Recommandations

V.2.1. Recommandations sur la méthodologie

En considération de la méthode V.T.A., trois diagnostics sont à suivre pour une appréciation complète de la santé d'un arbre (Mejean, 2010). Il est alors recommandé de :

- Prolonger la période d'observation de chaque individu pour avoir des informations plus précises et fiables par rapport aux résultats obtenus dans cette recherche,
- Insister sur l'observation du houppier : souvent jugée subjective, imprécise ou peu pertinente. La méthode de l'appréciation du houppier présente des avantages importants, parmi lesquels : celui de ne nécessiter qu'un équipement minimal (jumelles) et la possibilité de répéter la mesure sans perturber l'arbre. Ces avantages expliquent pourquoi l'appréciation visuelle des houppiers constitue la base de la surveillance sanitaire pratiquée à grande échelle depuis quelques années dans la plupart des pays européens (UNECE, 1986),
- Faire une comparaison de deux individus de même espèce (Helliwell, 2007) dont le premier bouché et le second laissé à l'air libre.
- Se référer à un arbre témoin pour évaluer la croissance de chaque espèce dans les études à venir.

Dans le cas d'un carottage jusqu'à la moelle (contrairement à la méthode pratiquée en 2016), il serait recommandé d'effectuer le carottage suivant un plan légèrement incliné vers le haut (vers l'intérieur) pour éviter la stagnation d'eau dans le trou.. La carotte ainsi obtenue doit être rectifiée selon l'analyse à effectuer, comme en dendrochronologie sur la mesure de la largeur des cernes pour respecter les plans ligneux. Des soins après le carottage doivent également se faire sur l'arbre concerné (rebouchage avec des bouchons traités avec des fongicides et insecticides ; les plaies de l'écorce recouvertes d'un baume cicatrisant ou peinture de blessure par exemple pour empêcher l'attaque des agents biologiques de dégradation). Les soins doivent être périodiques (4-5 mois) jusqu'à ce que l'arbre soit totalement cicatrisé.

Concernant le bouchon, il est conseillé de ne pas boucher le trou. Toutefois, des mastics, des bouchons de laboratoires ou des sciures de bois avec des colles peuvent être utilisés pour reboucher les trous et ainsi éviter la stagnation des eaux favorisant la pourriture de l'arbre dans le trou ainsi formé.

V.2.2. Recommandations pratiques issues de la recherche

❖ Choix des arbres à carotter

La présente étude a permis de définir des critères de choix des arbres à carotter en forêt. D'abord, le diamètre des arbres doit être supérieur à 8 cm, et le prélèvement de la carotte doit se faire à une hauteur supérieure à 1,30 m pour limiter les attaques des champignons parce que ici, les carottes ont été prélevées à 1,10 à 1,30 m du sol qui selon de nombreuses études sont infectées plus facilement par des champignons (Nevill, 1997). L'arbre doit également être bien exposé pour réduire l'humidité qui est un facteur de prolifération des champignons. Ensuite, l'arbre doit être bien droit suivant les analyses à effectuer. Finalement, ils ne doivent pas comporter des creux.

❖ Dynamiser les études sur les indicateurs de l'état sanitaire du bois à Madagascar

Les études liées à la santé des arbres à Madagascar sont encore peu nombreuses. Les ouvrages sur les caractéristiques et les propriétés physiques et mécaniques de toutes les espèces rencontrées à Madagascar sont incomplets et nécessitent plus de recherches approfondies. Pour la présente étude, il est recommandé d'investir dans les appareils de mesure et faire appel aux spécialistes dans chaque domaine pour un examen plus approfondi de l'étude de l'état sanitaire de l'arbre après le carottage.

Les laboratoires de recherche et les centres de formation en bois et en éléments botaniques sont encore peu développés à Madagascar et manquent d'équipements alors que les études pour apprécier le bois doivent être priorisées pour pouvoir profiter correctement de chaque espèce suivant leur particularité. En effet, il est intéressant dans cette étude d'identifier les champignons comme les insectes ou larves ou autres parasites trouvés sur les blessures causées par le carottage.

❖ Etendre les zones et la durée d'étude

La courte période d'analyse (20 mois) de l'état des arbres après le carottage limite les précisions sur les résultats de cette étude, outre le faible nombre d'individus analysés. Il faut, de ce fait revenir à Tampolo et revoir les arbres carottés dans environ 2 ans ou plus pour vérifier les informations obtenues et analyser l'évolution de chaque individu 4 ans après le carottage.

Il est également intéressant de faire la même étude dans les autres sites comme Mandraka pour comparer les indicateurs et ainsi obtenir des corrélations plus précises sur les paramètres considérés et le climat des deux sites.

VI. Conclusion

La pratique du carottage sur un arbre est considérée comme non destructive et moins coûteuse en temps par rapport au prélèvement de rondelles (disques de bois) et à l'abattage. Les résultats obtenus ici ont montré que le carottage n'a pas arrêté la croissance de l'arbre. Mais il y a certaines conséquences sur la santé de l'arbre, du moins jusqu'à la cicatrisation, puisqu'il a entraîné la prolifération des agents biologiques de dégradation autour de la blessure. Néanmoins, les degrés d'attaque des agents sont pratiquement négligeables par rapport au fait que le carottage soit une méthode de prélèvement d'échantillon de bois. Le degré de cicatrisation et d'attaque est différent pour chaque espèce, mais l'influence du facteur espèce sur les paramètres considérés est également différente. Le degré de prolifération des champignons peut varier selon l'espèce, selon l'épaisseur de l'écorce et influencé par l'humidité de la blessure. Mais l'exposition de la blessure au rayon du soleil peut aussi avoir une influence sur la cicatrisation de l'arbre. L'attaque des champignons et des insectes sont aussi liées à la durabilité naturelle du bois. Tous ces paramètres influencent l'avancé de la cicatrisation de l'arbre qui peut être différent dans les 2 côtés de la blessure.

D'une part, cette étude a permis d'analyser pour la première fois l'effet du carottage sur les arbres à Madagascar. Elle a montré que l'arbre après avoir été carotté peut continuer sa croissance malgré l'attaque des agents biologiques de dégradation. D'une autre part, l'étude a été fortement limitée par le nombre d'individus analysé et la courte durée d'analyse (20 mois), sans oublier que le bouchon constitue un mécanisme d'infiltration des champignons et peut nuire à la santé interne de l'arbre même si les dégâts superficiels sont limités. Sachant que les études sur le carottage participent à la conservation des forêts notamment des espèces fréquemment ciblées par des études nécessitant un prélèvement d'échantillon, ce travail vise à rassurer les gestionnaires des sites de collecte des échantillons sur les impacts engendrés par la méthode sur les arbres : la croissance des arbres continue et les blessures sont en train de se cicatriser.

Deux études pourraient suivre ce travail, d'abord (i) une étude plus approfondie sur l'effet du carottage sur les arbres dans d'autres sites en considérant des conditions climatiques différentes, comme dans la région sèche de Madagascar où il y a moins d'humidité et probablement moins d'attaques d'agents de dégradation, et sur une plus longue durée ; puis (ii) une autre sur le rebouchage ou non des trous suite au carottage. Ainsi, en quoi sont différents les paramètres à analyser dans les régions sèches et dans les régions humides pour une bonne pratique du carottage à Madagascar ?

Références bibliographiques

- **Beauchêne, J. (2006)**, *Les Agents de dégradation du matériau bois*, CIRAD.
- **Bosquet L. (2006)**, « Cours de statistique sur la corrélation » in *Méthodologie de la recherche*, Université Lille 2.
- **Burnel L. et Pélissier C. (2009)**, « Méthode de préparation d'échantillon de bois feuillus pour utilisation en dendrochronologie » in *Cahier des techniques INRA 2009*, 66 : 5-12.
- **Chailet A. (2016)**, « La réaction des arbres aux plaies de taille » in *Préservation et valorisation du patrimoine fruitier*, Vergers vivants.
- **Clesse, B. (2008)**, « De l'observation des champignons lignicoles à la nécessité de conserver des bois morts » in *L'Érable* : 9-20.
- **CTBA Collectif (2000)**, *Le traitement des bois dans la construction*, Paris, Eyrolles.
- **Dawkins (1963)**, *The productivity of tropical high forest trees and their reaction to controllable environment*, Ph. D, University of Oxford.
- **Dirol, D. & Deglise, X. (2001)**, Durabilité des bois et problèmes associés. HERMES Sciences Publications (Ed.), Paris.
- **Edlund, M.L., Evans, F. & Henriksen, K. (2006)**, « Testing durability of treated wood according to EN 252 Interpretation of data from Nordic test fields » in *Nordic Innovation Centre project 04022* : 2- 13.
- **Edward W. J. Tsen E.W.J., Sitzia T., Webber B.L. (2015)**, “To core, or not to core: the impact of coring on tree health and a best-practice framework for collecting dendrochronological information from living trees” in *Biological reviews*, 91: 899-924.
- **Fabréga S. (2009)**, « Fixer la valeur économique de la biodiversité » in *Rapport Chevalus-au-bois*.
- **Fraiture, A. (2008)**, « Introduction à la mycologie domestique, Les champignons qui croissent dans les maisons » in *Revue du Cercle de Mycologie de Bruxelles*, 8 : 25-56.
- **Geffray S. (2009)**, *Corrélation linéaire et régression linéaire simple*, IRMA, Nantes, IUT Carquefou.
- **Geremia F. & Nassau M., Millier et al. (2006)**, « Le point sur le carottage mécanisé d'arbres vivants » in *Méthodes et outils pour l'observation et l'évaluation des milieux forestiers, prairiaux et aquatiques – Le Cahier des Techniques INRA* numéro spécial : 83 – 86.
- **Ghazil S. (2010)**, *Etude de la migration des fluides dans le bois*, thèse de doctorat, université Henri Pointcaré, Nancy-1, France.
- **Gierlinger N., Jacques D., Grabner M., Wimmer R., Schwanninger M., Rozenberg P., Pâques L.E. (2004)**, “Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance” in *Trees*, 18 : 102-108.

- **Goodman S.M. & Ratsirarson J. (2005)**, *Suivi de la biodiversité de la forêt littorale de Tampolo*, Ministère de l'education nationale et de la recherche scientifique, CIDST.
- **Goodman S.M. & Ratsirarson J. (1998)**, *Inventaire biologique de la forêt littorale de Tampolo (Fenoarivo Atsinanana)*, Ministère de l'education nationale et de la recherche scientifique, CIDST.
- **Helliwell D.R. (2007)**, “A short note on effects of boring holes in trees” in *Arboricultural Journal*, 30 : 245-248.
- **ITTO (1998)**, *Identification, properties and uses of some southeast asian woods*, chinese academy of forestry, Beijing, Whan Shou Shan.
- **Jebrane, M., Pockrandt, M. & Terziev Nasko (2014)**, “Natural durability of selected larch and Scots pine heartwoods in laboratory and field tests” in *International Biodeterioration Biodegradation*, 91 : 88-96.
- **Jehanno M. (2011)**, *Etude des lémuriens Nocturnes de la Forêt protégée de Tampolo*, BTS Gestion Protection de la Nature, Lycée de Kerplouz-56400 Auray.
- **Jozsa L. (1988)**, *Increment core sampling techniques for high quality cores*, Research scientist wood, science department, Forintek Canada Corporation.
- **Landmann G. (1988)**, « Comment apprécier la vitalité d'un arbre ou d'un peuplement forestier » in *Revue Forestière Française*, 4 : 265 - 284.
- **Limousin (2011)**, *Anatomie des bois*. CRPF-Fogefor.
- **Lissan B. (2014)**, « Présentation, rôles, services, menaces & préservation » in *Importance des arbres et des forêts*.
- **Maranhão C.A., Pinheiro I.O., Santana L.B.D.A., Oliveira L.S., Nascimento M.S., Bieber L.W. (2013)**, « Antitermitic and antioxidant activities of heartwood extracts and main flavonoids of Hymenaea stigonocarpa Mart » in *International Biodeterioration & Biodegradation*, 79: 9-13.
- **Mburu, F., Sirmah,P., Muisu, F., Dumarcay, S. & Gérardin, P. (2013)**, « Selected Wood Properties of Prunus Africana(Hook) Grown in Kenya as Possible Reasons for its High Natural Durability » in *DRVNA INDUSTRIJA* 64 (1) : 19-24.
- **Mejean G. (2010)**, *Diagnostic de l'état physiologique, sanitaire et biomécanique de 7 pins d'Alep*, Calvisson, Direction régionale Méditerranée.
- **Meyer, W. H., and S. B. Hayward (1936)**, “Effect of increment boring on Douglas fir” in *Journal of Forestry*, 34:867 -869.
- **Ministère de l'Agriculture, (2010)** bulletin n°25. *Les blessures des arbres, Commission d'études des ennemis des arbres, des bois abattus et des bois mis en œuvre*, Administration des forêts, chasse et pêche.

- **Nevill R.J. (1997)**, « Aperçu des blessures des arbres », in *Ressources naturelles Canada*, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria, C-B. Notes de Transfert Technologique 03.
- **Pouzoulet J., Scudiero E., Shiavon M., Rolshausen P.E. (2017)**, Xyleme Vessels Diamter affects Affects the Compartmentalization of the Vascular Pathogen Phaeomoniella chlamydospora in Grapevine, *Front. Plant Sci.* 8:1442. doi: 10.3389/fpls.2017.01442
- **Raholivelon L. C. (1994)**, *Contribution à l'étude écologique de la forêt sublittorale de Tampolo (Fénérive Est)*. Mémoire de DEA en SBA Option Ecologie Végétale, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo.
- **Rajoelison L. G. (1995)**, *Etude de la structure et de la dynamique d'une forêt littorale exploitée en vue de son aménagement sylvicole (Exemple de la forêt de Tampolo)*, thèse de doctorat en Sciences agronomiques – Option Eaux et Forêts; 181p, Université d'Antananarivo.
- **Rakotovao G., Rabevohitra A.R., P. Collas de Chatelperron, Guibal D., Gérard J. (2012)**, *Atlas des bois de Madagascar*, Ed. Quae.
- **Randrianoely M. (2017)**, *Etude comparative de la communauté des agents biologiques qui dégradent le bois rencontrés sur trois sites (Mandraka et Ankatso)*, Master en Sciences agronomiques – Options Eaux et Forêts, Université d'Antananarivo.
- **Razafimahatratra AR, Rakotovololonalimanana H, Thevenon MF, Belloncle C, Rajemison A, Solofofiaviantsoa M, Randrianoely M, Ramananantoandro T. (2017)**, Potentialités de la diversité des espèces de bois malgaches : analyse de la variabilité des propriétés chimiques et de la durabilité naturelle de huit essences de la forêt de Mandraka (projet spirmadbois). Forum de la recherche « Biodiversité et objectifs du développement durable », 14-15-16 juin 2017 - Antananarivo – Madagascar.
- **Saha Tchinda J.B. (2015)**, *Caractérisation et valorisation des substances extractibles de cinq essences camerounaises majeures de l'industrie du bois : Ayous, Moabi, Movingui, Padouk et Tali*, thèse de doctorat, Université de Lorraine, France.
- **Santana A.L.B.D., Maranhão C.A., Santos J.C., Cunha F.M., Conceição G.M., Bieber L.W., Nascimento M.S. (2010)**, « Antitermitic activity of extractives from three Brazilian hardwoods against Nasutitermes corniger » in *International Biodeterioration & Biodegradation*, 64: 7-12.
- **Sau S. (1997)**, *Les arbres*, Livre du Maître, Ministère de l'Education Port-Vila, république de Vanuatu.
- **Taylor A.M., Gartner B.L., Morrell J.J. (2006)**, “Effects of Heartwood Extractive fractions of *Thuja plicata* and *Chamaecyparis nootkatensis* on wood degradation by termites or fungi”, in *Journal of Wood Science*, 52 : 147-153.
- **Trouy M.C. (2016)**, « Matériaux bois – Durabilité » in *Technique de l'ingénieur*, C926 v3.

- **UNECE EXECUTIVE BODY FOR CONVENTION ON LONG-RANGE TRANS-BOUNDARY AIR POLLUTION (1986), *Elements of a draft manual : methodologies and criteria for harmonised sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests in the ECE region***, UNECE Draft Publication.
- **Zanne A., Sweeney K.P., Sharma M., Orians C.M. (2006)**, “Patterns and consequences of differential vascular sectoriality in 18 temperate tree and shrub species” in *Functional Ecology* 20(2):200–206.

Webographie

- <http://dendrochronologie-tpe.e-monsite.com/pages/ii-la-dendrochronologie-methode-de-datation-scientifique/a-methode.html>https://planificateur.acontresens.net/afrique/madagascar/mg_01/tampolo/1055920.html, consulté en janvier 2018.
- <http://dendrochronologie-tpe.e-monsite.com/pages/ii-la-dendrochronologie-methode-de-datation-scientifique/a-methode.html>, consulté en janvier 2018.
- <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Hamamelidaceae/fr-fr/>, consulté en février 2018.
- http://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC_T_2015_0113_SAHA_TCHINDA.pdf, consulté en janvier 2018.
- <http://passion.bois.free.fr/le%20materiau%20bois/les%20alterations%20du%20bois/les%20alterations%20du%20bois.htm>, consulté en janvier 2018.
- <http://www.arboriste-conseil.com/images/presentation-activite-arboriste.pdf>, consulté en février 2018.
- http://www.arthur-elagage.fr/wa_files/78851_15reactiondesarbresauxblessures.pdf, consulté en février 2018.
- http://www.cndb.org/?p=densite_durete, consulté en février 2018.
- <http://www.copalme.org/?L-analyse-de-l-etat-sanitaire-de-l>, consulté en janvier 2018.
- <http://www.hamel-et-kaech.ch/images/stories/1d980000.gif>, consulté en février 2018.
- <http://www.hisseo-charpente.com/admin/photos/Le%20bois%20et%20ses%20proprietes%20technique%20appliques%20a%20la%20construction.pdf>, consulté en février 2018.
- <http://www.iml-na.com/en/how-it-works/vta-visual-tree-assessment/>, consulté en février 2018.
- <http://www.tela-botanica.org/actu/article3740.html>, consulté en janvier 2018.
- https://books.google.mg/books?id=4MpmAgAAQBAJ&pg=PA354&lpg=PA354&dq=gaertnera+densit%C3%A9&source=bl&ots=hFe3jCaN4-&sig=tpCJe02xE-_NFG1Ho-Zht8fn_ll&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKEwiY7onSzpvZAhVHBiwKHWtMAKoQ6AEIJjAA#v=onepage&q=gaertnera%20densit%C3%A9&f=false, consulté en février 2018.

- <https://tice.agroparistech.fr/coursesenligne/courses/WOODNAT/document/Chapitre%202%20Structure%20et%20fonction%20du%20bois-4.html>, consulté en février 2018.
- <https://www.rustica.fr/articles-jardin/arbres-combien-temps-vont-ils-vivre,2003.html>, consulté en février 2018.

Annexe

Annexe 1 : Fiche individuelle d'un individu

N° arbre :

Ancienne identification :

Nom vernaculaire :

Coordonnées géographiques			
Circonférence			
Hauteur totale			
Houppier			
Stabilité			
Degré de Cicatrisation (2 côtés)	Code :	En mm (taille non cicatrisé):	
Champignons sur l'écorce	Code :	IC Edlund:	Couleur :
Champignons sur l'aubier	Code :	IC Edlund:	Couleur :
Champignons sur le duramen	Code :	IC Edlund:	Couleur :
Insectes/larves sur l'écorce			
Insectes/larves sur l'aubier			
Insectes/larves sur le duramen			
Bouchon	Présence		
	Rétrécissement		
	Degré attaque champignon		
Eau			
Epaisseur écorce			
Remarques			
N° photo	(trous, cicatrisation, bouchon)		

Annexe 2 : Ecart entre les deux diamètres

Nom vernaculaire	Nom scientifique	DHP en 2016 : lors du carottage (cm)	DHP en 2018 :20 mois après carottage (cm)	Ecart (cm)
Aferonakavy	<i>Elaeocarpus</i> sp.	13,4	14,14	0,74
Aferonakavy	<i>Elaeocarpus</i> sp.	15,3	15,99	0,69
Dodoka	<i>Gaertnera macrostipula</i>	12,7	13,5	0,8
Hazoambo	<i>Xylopia</i> sp.	12,7	14,3	1,6
Rarà	<i>Brochoneura acuminata</i>	13,1	13,2	0,1
Rarà	<i>Brochoneura acuminata</i>	13,3	13,7	0,4
Tsilongodongotra	<i>Dicoryphe macrophylla</i>	18,3	18,73	0,43
Tsilongodongotra	<i>Dicoryphe stipulacea</i>	15,1	16,47	1,37
Voantsilaka	<i>Polyscias</i> sp.	14,6	16,05	1,45
Voantsilaka	<i>Polyscias</i> sp.	16,2	16,75	0,55

Source : Auteur, 2018

Annexe 3 : Pourriture molle



Source : Beauchêne, 2006

Annexe 4 : Pourriture blanche ou fibreuse



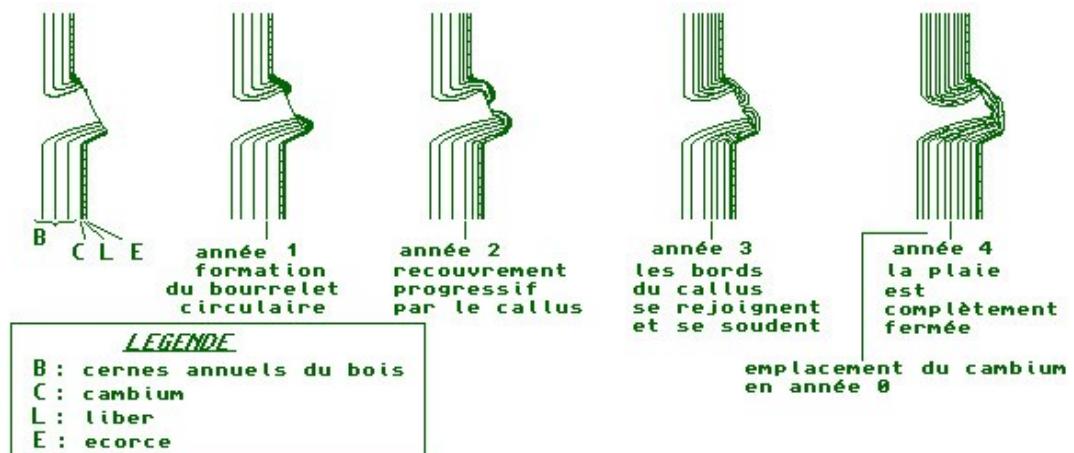
Source : Clesse, 2008.

Annexe 5 : Pourriture brune ou cubique



Source : Fraiture, 2008

Annexe 6 : Cicatrisation d'un arbre blessé



Annexe 7 : Principe d'identification de l'indice de conservation et d'évaluation de la durabilité naturelle à travers l'importance des dégâts observés (EDLUND)

Notation	Classification des dégâts observés	Etat de l'échantillon testé	Indice de conservation (%)	Etat de la Durabilité Naturelle
0	Aucun	Echantillon absolument intact ne portant ni de trace de dégradation de la couleur ni de trou ou de galerie	100	Très durable
1	Faible	Echantillon très légèrement attaqué qui ne comporte qu'un simple changement de la couleur, et une dégradation superficielle	90	Durable
2	Moyen	Dégradation marquée de l'échantillon. Celle-ci s'étend d'une manière modérée sur la surface de l'échantillon. Il est caractérisé par la présence de trous de profondeur 2mm à 3mm sur la partie mise sous terre	75	Moyennement durable
3	Forte	Dégradation sévère caractérisée soit par la présence de trous de 3 à 5 mm sur une surface élargie soit par la présence de trous de 10 à 15mm sur de plus petite surface. Ces dégâts sont suffisants pour obliger à changer la pièce si elle était en place dans une construction.	50	Peu durable
4	Très forte	Echantillon ne présentant plus de cohésion, et qui serait déjà détaché des pièces voisines s'il était incorporé dans un ouvrage	0	Non durable

Annexe 8 : Corrélation entre les paramètres analysés

Censé être « non destructif et moins coûteux en temps que le prélèvement de rondelles » (Burnel et Pélissier, 2009), le carottage a causé de nombreuses dégradations selon les résultats vus précédemment. De plus, les carottes ont été prélevées à 1,10 à 1,30 m du sol. De nombreuses études signalent que les blessures des racines, à la base de l'arbre ou en contact avec le sol peuvent être infectées plus facilement par des champignons provoquant une carie que celles infligées à plus de 1,30 m (à hauteur de poitrine) (Nevill, 1997).

Pour l'étude de la relation entre les paramètres analysés, deux propriétés de l'arbre dont la densité et la durabilité naturelle ont été prises en compte. Les valeurs de la densité des trois individus d'« aferonakavy », du « hazoambo », des deux « hazondraharaaha », du tsopatika et des deux « voantsilaka » sont respectivement de 0,61, de 0,62, de 0,72, de 0,88 et de 0,58 (Rakotovao *et al.*, 2012). Celles du « dodoka » et des deux « tsilongodongotra » ont été tirées à partir de leur famille et valent respectivement 0,66 et 0,86 (ITTO, 1988).

La durabilité naturelle est déterminée par des essais de champ (exposition des éprouvettes normalisées au contact de différentes sources de contamination : sol, air, intempéries) et par des essais biologiques en laboratoire (éprouvettes soumises à l'attaque de souches de champignons en milieu confiné). Le niveau de durabilité d'une essence est déterminé par la perte de masse des éprouvettes attaquées par les agents d'altération de bois (Rakotovao *et al.*, 2012).

Annexe 9 : Durabilité naturelle des espèces étudiées

Espèce	Ak	Hb	Rr	Tpk	Vk	Dk	Tg
Durabilité naturelle	0 (non durable)	1 (peu durable)	1	4 (très durable)	0	2,5 (moyen à durable)	2 (moyen)

Source : Rakotovao *et al.*, 2012 & ITTO, 1988.

ak : aferonakavy, dk : dodoka, hb : hazoambo, rr : hazondraharaaha, tg : tsilongodongotra, tpk : tsopatika, vk : voantsilaka.

Annexe 10 : Corrélation par rapport à l'état du bouchon

Indicateur	DHP	Eau	Houppier	C/E	Stabilité	C/R	Champignon
Coefficient							
de corrélation	0,0004	0,0048	0,0077	0,0106	0,0459	0,1227	0,1331

Source : Auteur, 2018

C/E : Relation cicatrisation et état du bouchon

C/R : Relation entre cicatrisation et rétrécissement du bouchon

Annexe 11 : Coefficient de corrélation entre les indicateurs

Indi.																				
d	d																			
D.N.	-	D.N																		
DHP	-	-	DHP																	
Houp.	-0,394	-0,302	0,089	Houp.																
Stab.	-0,360	0,074	-0,278	0,189	Stab.															
Cic.	0,026	0,062	0,285	-0,406	-0,010	Cic.														
Champ.	0,092	0,013	0,198	0,032	0,453	0,007	Champ.													
Ins.	0,0004	0,029	0,018	0,213	0,082	-0,405	0,001	Ins.												
Bouc.	-0,276	0,008	0,0004	0,008	0,214	0,011	0,133	0,557	Bouc.											
Eau	-0,459	-0,323	-0,212	0	0,735	0,179	0,316	-0,073	0,004	Eau										
Ecor.	-	-	-	0,107	0,452	0,206	0,056	-0,058	0,032	0,254	Ecor.									

Source : Auteur, 2018.

d : densité, D.N. : durabilité naturelle, DHP : Diamètre à Hauteur de Poitrine, Houp. : état du houppier, Stab. : stabilité, Cic. : degré de cicatrisation, Champ. : degré d'attaque des champignons, Ins. : degré d'attaque des insectes, Bouc. : bouchon, Ecor. : épaisseur de l'écorce.

Annexe 12 : Trou entièrement cicatrisé après 4 ans sur *Alnus sp.*



Source : Auteur, 2018

Annexe 13 : Coordonnées GPS des arbres carottés

N° arbre	Nom vernaculaire	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Coupé
1	Tsopatika	S 17.28782°	E 049.40934	12	Non
2	Hazondrahahara 1	S17.28740°	E049.42015°	10	Non
3	Hazondrahahara 2	S17.28735°	E049.42081°	6	Non
4	Hazoambo	S17.28200°	E049.42294°	8	Non
5	Aferonakavy 1	S17.28998°	E049.41453°	16	Non
7	Hazomamy	S17.29032°	E049.40773°	18	Oui
8	Vontsilaka 1	S 17.28213°	E 049.42278°	21	Non
9	Tsilongodongotra 1	S 17.28239°	E 049.42290°	21	Non
10	Aferonakavy	S17.28233°	E049.40966°	15	Oui
11	Maimbovitsika	S17.27439°	E049.41578°	-6	Oui
12	Hazombatofotsy	S17.28650°	E049.40910°	15	Oui
13	Tsifo	S17.28397°	E049.40995°	20	Oui
14	Aferonakavy	S17.28385°	E049.40930°	17	Oui
15	Aferonakavy	S17.28906°	E049.41471°	15	Oui
16	Dodoka	S 17.28944°	E 049.41462°	18	Non
17	Aferonakavy 2	S 17.28967°	E 049.41456°	18	Non
18	Hazombatofotsy	S17.28767°	E049.41653°	32	Oui
19	Tsilongodongotra 2	S 17.28734°	E 049.41974°	14	Non
20	Tsilongodongotra	-	-	-	Oui
21	Voantsilaka 2	-	-	-	Non
22	Aferonakavy 3	S 17. 28732°	E 049.41888°	29	Oui (à 1,60 m du sol)
23	Tsifo	S17.28772°	E049.41454°	14	Oui

Source : Auteur, 2018

Table des matières

Remerciements.....	i
Sommaires	ii
Liste des illustrations.....	iii
Acronymes.....	v
Glossaire	vi
Résumé.....	vii
Abstract	viii
Famintinana	ix
I. Introduction	1
II. Problématique et hypothèses	2
II.1. Problématique	2
II.2. Hypothèses et Objectifs	3
II.2.1. Hypothèses	3
II.2.2. Objectifs de l'étude.....	3
III. Matériels et méthodes.....	4
III. 1. Site d'étude.....	4
III.1. 1. Situation géographique	4
III.1. 2. Milieu physique	4
III. 2. Etat de l'art.....	6
III.2. 1. Constitution d'un tronc d'arbre : rôle des principales parties du tronc.....	6
III.2. 2. Composition chimique du bois	7
III.2. 3. Les agents biologiques de dégradation	8
III. 3. Matériels d'études	10
III. 4. Méthodes	10
III.4.1. Recherches bibliographiques	10
III.4.2. Prélèvements des carottes en 2016	10
III.4.3. Recherche de l'emplacement des individus, collecte d'herbiers	11
III.4.4. Les paramètres analysés.....	12
III.4.5. Analyse et traitement des données.....	16
III.4.6. Analyse des arbres coupés	16
III. 5. Cadre opératoire	17
IV. Résultats et interprétations.....	18
IV.1. Effet du carottage sur la croissance, l'état du houppier et la stabilité de l'arbre	
18	

IV.1.1.	Effet sur la croissance de l'arbre.....	18
IV.1.2.	Effet sur le houppier	18
IV.1.3.	Effet sur la stabilité de l'arbre.....	19
IV.2.	Prolifération des agents biologiques de dégradations autour de la blessure	20
IV.2. 1.	Prolifération des champignons.....	20
IV.2. 2.	Prolifération des insectes/larves.....	22
IV.3.	Degré de cicatrisation.....	24
IV.4.	Etat des bouchons.....	25
IV.5.	Cas particuliers : analyse des arbres coupés illicitement à la hache	28
V.	Discussions et recommandations.....	28
V.1.	Discussions	28
V.1.1.	Discussion sur la méthodologie	28
V.1.2.	Discussion sur les résultats	30
V.1.3.	Vérification des hypothèses.....	32
V.2.	Recommandations.....	33
V.2.1.	Recommandations sur la méthodologie.....	33
V.2.2.	Recommandations pratiques issues de la recherche	34
VI.	Conclusion	35
	Références bibliographiques.....	36
	Annexe	I