



**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO**  
**ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES**  
**DEPARTEMENT DES EAUX ET FORETS**

-----  
Promotion Vahatra

Année : 2011 – 2016

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur en Sciences Agronomiques et  
Environnementales au grade Master de Recherche en Foresterie et Environnement  
Parcours : Ecosystème et Biodiversité

**Etude de la durabilité en service d'essences forestières de  
Mandraka en vue de déterminer leur groupe d'appartenance parmi  
les bois malgaches**

Cas de : *Bosqueia danguyana* Leandri (Dipaty), *Garcinia sp.* (Kijy), *Neotina isoneura* (Radlk.) Capuron  
(Felamborona), *Cedrela odorata*, *Weinmannia rutenbergii* (Lalona), *Tambourissa trichophylla* Baker  
(Ambora), *Agauria sp.* (Angavo), *Nuxia capitata* (Valanirana)

Par : SOLOFOFIAVIANTSOA Martina

Soutenu le : 10 Août 2016

Devant le jury composé de :

Président : Professeur RANDRIAMBOAVONJY Jean-Chrysostome

Rapporteur : Docteur RAMANANANTOANDRO Tahiana

Rapporteur : Docteur RAKOTOVOLOLONALIMANANA Herizo

Examineur : Docteur RAJEMISON Andraina

Examineur : Docteur RAKOTOARIMANGA Nirina



**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO**  
**ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES**  
**DEPARTEMENT DES EAUX ET FORETS**

-----  
Promotion Vahatra

Année : 2011 – 2016

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur en Sciences Agronomiques et  
Environnementales au grade Master de Recherche en Foresterie et Environnement  
Parcours : Ecosystème et Biodiversité



**Etude de la durabilité en service d'essences forestières de Mandraka en vue de  
déterminer leur groupe d'appartenance parmi les bois malgaches**

Cas de : *Bosqueia danguyana* Leandri (Dipaty), *Garcinia sp.* (Kijy), *Neotina isoneura* (Radlk.) Capuron  
(Felamborona), *Cedrela odorata*, *Weinmannia rutenbergii* (Lalona), *Tambourissa trichophylla* Baker  
(Ambora), *Agauria sp.* (Angavo), *Nuxia capitata* (Valanirana)

Par : SOLOFOFIAVIANTSOA Martina

Soutenu le : 10 Août 2016

Devant le jury composé de :

Président : Professeur RANDRIAMBOAVONJY Jean-Chrysostome

Rapporteur : Docteur RAMANANANTOANDRO Tahiana

Rapporteur : Docteur RAKOTOVOLOLONALIMANANA Herizo

Examineur : Docteur RAJEMISON Andraina

Examineur : Docteur RAKOTOARIMANGA Nirina

*« Le commencement de la sagesse, c'est la crainte de  
l'Éternel ; Et la science des saints, c'est l'intelligence  
(Proverbes, 9 : 10) »*

## REMERCIEMENTS

J'adresse à priori mes plus sincères remerciements à Dieu, l'Éternel pour sa bénédiction et tout son Amour.

A l'issue de la réalisation de tous les travaux liés à la présente recherche, je tiens particulièrement à témoigner toute ma reconnaissance à :

- Monsieur RANDRIAMBOAVONJY Jean-Chrysostome, Chef de l'UFR « Gestion de l'Eau et des Sols » au niveau de la mention Forêts et Environnement à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), qui m'a fait le grand honneur de présider cette soutenance ;
- Madame RAMANANANTOANDRO Tahiana, Chef de l'UFR « Sciences du bois » au niveau de la mention Forêts et Environnement à l'ESSA qui m'a encadré tout au long des travaux de recherche. Son dévouement et son soutien m'ont permis d'arriver à termes de ce travail ;
- Monsieur RAKOTOVOLOLONALIMANANA Herizo, enseignant à l'ESSA-Forêts qui a joué le rôle d'encadreur et qui m'a offert un soutien pédagogique et moral ;
- Monsieur RAJEMISON Andraina, Assistant de formation et de recherche à l'ESSA-Forêts, qui a accepté de siéger en tant qu'examineur de cette soutenance ;
- Monsieur RAKOTOARIMANGA Nirina, Chercheur – Enseignant au Centre National de Recherches sur l'Environnement, Laboratoire de Microbiologie de l'Environnement (CNRE/LME), qui a répondu favorablement à notre sollicitation d'examiner ce travail ;
- Les responsables au sein du Département de Recherche Forestière et Piscicole pour l'usage des éprouvettes d'essai ;
- Monsieur SOLOFO, responsable de la Station Forestière de la Mandraka, pour toute l'aide qu'il m'a apportée pour la mise en place des dispositifs d'expérimentation et la collecte de données ;
- Les responsables au sein de Madagascar Biodiversity Center pour le soutien inconditionnel qu'ils m'ont offert ;
- Les responsables au sein du CNRE, particulièrement Monsieur RANDRIANJOHANY Emile pour son dévouement et sa collaboration ;
- Madame THEVENON Marie France qui m'a fait dons de ses précieux conseils pour mener à bien cette recherche ;
- Les enseignants, les responsables et tout le personnel au sein du département et de l'ESSA ;
- Toute l'équipe de l'UFR Bois, Monsieur RATOVOMBOAHANGY Bruno, Rado, Ravo, Amy, Zo, Diary, Vonjy, Patrick ;
- Les étudiants de la faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, Bodo et Annah ;
- Les étudiants de la promotion ANDRISA, Anjara et Meva qui m'ont aidé dans la collecte des rondins de bois ;
- Toute ma famille, tous mes amis et la promotion VAHATRA qui m'ont fortement soutenu ;
- Toute personne qui a de loin ou de près contribué à la réalisation de ce travail.

Martina SOLOFOFIAVIANTSOA

## **PRESENTATION DU PARTENAIRE**

SPIRMAD Bois est un projet de recherche qui met en liaison plusieurs partenaires à savoir le département des Eaux et Forêts de l'Université d'Antananarivo, CIRAD Brésil, l'Ecole Supérieure d'Agriculture de l'Université de Sao Paulo-Brésil, LRI de l'Université d'Antananarivo, CIRAD Montpellier et l'Ecole Supérieure du Bois de Nantes. L'objectif du projet est de renforcer les capacités des malgaches pour la caractérisation du bois et l'identification d'espèces forestières autochtones.

Pour atteindre son objectif, le projet prévoit d'utiliser la spectroscopie proche infrarouge (SPIR) pour estimer les propriétés des bois, d'aider à identifier les essences de bois et de déterminer les origines géographiques des échantillons de bois mais aussi la mise en place d'une xylothèque et d'une base de données sur les bois malgaches.

La présente recherche s'insère dans le cadre du projet SPIRMADBOIS. L'étude de la durabilité en service des espèces forestières autochtones de Mandraka contribue à l'enrichissement des données sur les bois malgaches et présente des perspectives pour des études ultérieures.

## RESUME

Le bois constitue un matériau d'une importance sociale et économique à Madagascar. Toutefois l'exploitation se limite à une cinquantaine d'espèces alors que la grande île dispose d'une large diversité d'essences ligneuses. Ce déséquilibre est dû au manque de connaissances sur les bois malgaches. A ce jour, les bases de données existantes se limitent aux propriétés physiques et mécaniques du bois. Les informations sur la durabilité naturelle sont très restreintes alors qu'elle détermine la classe d'emploi adaptée au bois. Pour enrichir ces informations, la présente étude se propose d'étudier la durabilité de huit espèces forestières de la Mandraka à savoir *Bosqueia danguyana* Leandri (Dipaty), *Garcinia sp.* (Kijy), *Neotina isoneura* (Radlk.) Capuron (Felamborona), *Cedrela odorata*, *Weinmannia rutenbergii* (Lalona), *Tambourissa trichophylla* Baker (Ambora), *Agauria sp.* (Angavo) et *Nuxia capitata* (Valanirana). L'expérimentation de champ conformément à la norme EN 252 (1989) a été adoptée au niveau de deux zones d'étude, Mandraka et Ankatso pour une durée de six mois. Les critères d'évaluation considérés sont la perte de masse et l'indice de conservation. Les résultats ont montré qu'en considérant la perte de masse, les conditions du milieu à Mandraka sont moins favorables à la dégradation du bois ( $PM = 19,81 \pm 0,85\%$ ) par rapport à la station d'Ankatso ( $PM = 32,75 \pm 0,77\%$ ). Par contre, selon l'indice de conservation, les espèces Ambora, Lalona et Angavo sont moins résistantes face aux conditions du site à Mandraka que dans la station d'Ankatso. Les dégâts observés se limitent généralement à une détérioration de la couleur du bois et la présence de champignons comme agent d'altération. L'ordre de durabilité croissante des espèces n'est pas identique pour les deux stations. Mais l'espèce *Cedrela odorata* est la plus sensible à la dégradation par rapport aux autres espèces. Concernant la corrélation entre les propriétés physiques et la perte de masse, elle est très forte et négative pour le retrait tangentiel. La corrélation est forte et négative entre le retrait volumique et la perte de masse. Par contre, elle est positive et modérée entre le retrait tangentiel et l'indice de conservation. Ces informations constituent ainsi des bases pour la suite de l'expérimentation. La mise en place des dispositifs d'essai pour la présente étude peut servir d'exemple pour développer la connaissance sur la durabilité des bois malgaches. Pour cette recherche, un suivi périodique est préconisé à intervalle de six mois ainsi que l'étude d'autres propriétés du bois relatifs à la durabilité naturelle à savoir les extractibles et la teneur en lignine.

Mots clés : bois, Madagascar, durabilité naturelle, propriétés physiques, agents d'altération du bois

## ABSTRACT

Wood is a material of social and economic importance to Madagascar. However the valorization is limited to fifty species while the Island has a wide variety of tree species. This imbalance is due to the lack of knowledges about Malagasy wood. Nowadays, existing databases are limited to physical and mechanical properties of wood. Informations about natural durability are very limited when they determine the suitable use for wood. To enrich these informations, this research is proposed to study the natural durability of eight forest species from Mandraka namely *Bosqueia danguyana* Leandri (Dipaty), *Garcinia sp.* (Kijy), *Neotina isoneura* (Radlk.) Capuron (Felamborona), *Cedrela odorata*, *Weinmannia rutenbergii* (Lalona), *Tambourissa trichophylla* Baker (Ambora), *Agauria sp.* (Angavo) and *Nuxia capitata* (Valanirana). The field's experiments in accordance to EN 252 (1989) was adopted at two study areas, Mandraka and Ankatso for a period of six months. The evaluation criteria considered are mass loss and preservation index. The results showed that according to the weight loss, environmental conditions in Mandraka is less favorable to the degradation of wood ( $WL = 19,81 \pm 0,85\%$ ) compared to Ankatso ( $WL = 32,75 \pm 0,77\%$ ). The preservation index showed that the species Ambora, Lalona and Angavo are less resistant to site conditions in Mandraka compared to Ankatso. The damage observed are generally limited to a deterioration of the color of the wood and the presence of fungi as weathering agent. The order of increasing durability of wood species is not identical for both stations. But *Cedrela odorata* is the most sensitive to degradation compared to the others species. Regarding the correlation between weight loss and physical properties, there is a negative and very strong correlation for tangential shrinkage. The correlation is strong and negative between cubic measures and weight loss. However, there is a positive and moderate correlation between tangential shrinkage and preservation index. These informations from this study are basis for further experimentation. The establishment of testing devices in this study may serve as an example to develop knowledges about natural durability of Malagasy wood species. For this research, periodic monitoring is recommended every six months as well as the study of other properties of wood related to the natural durability namely extractives and lignin content.

Keywords : woods, Madagascar, natural durability, physical properties, wood weathering agents

## FAMINTINANA

Ny hazo dia akora manan-danja ara-tsosialy sy ara-toekarena eto Madagasikara. Na dia izany aza dia voafetra eo amin'ny dimampolo ihany ireo karazan-kazo fampiasa na dia manankarena karazan-kazo aza ny Nosy. Marihina fa ny tsy fahafenoan'ny fahalalana mahakasika ny hazo malagasy no antony mahatonga izany. Mandrak'ankehitry, tsapa ho manify ihany ny tahirin-kevitra mahakasika ny hazo malagasy. Ny fahalalana misy dia voafetra ho amin'ny fahafatanrana ny toetoetra fizika sy mekanikan'ny hazo. Tena manify dia manify ny fahalalana mahakasika ny faharetana ara-boajanaharin'ny hazo nefa mamaritra ny sokajy fampiasa sahaza azy izany. Hanatevenan-daharana ny fikarohana efa nisy dia natao ity asa fikarohana ity izay mikasika indrindra ny faharetana ara-boajanaharina karazan-kazo valo avy ao Mandraka : *Bosqueia danguyana* Leandri (Dipaty), *Garcinia sp.*(Kijy), *Neotina isoneura* (Radlk.) Capuron (Felamborona), *Cedrela odorata*, *Weinmannia rutenbergii* (Lalona), *Tambourissa trichophylla* Baker (Ambora), *Agauria sp.* (Angavo) sy *Nuxia capitata* (Valanirana). Ny asa fanandramana dia mifanaraka amin'ny fenitra eropeanina EN 252 (1989) ary nototsaina tamina faritra roa samihafa, Mandraka sy Ankatso nandritry ny enim-bolana. Ny sivam-pandrefesana noraisina dia ny fienan'ny lanjan'ny hazo sy ny taham-pihazonan'ny hazo ny endriny. Ny vokatry ny asa fikarohana dia mampiseho fa raha ny fahaverezan'ny lanjan'ny hazo no resahina dia miteraka fahasimbana kokoa ny toeram-panandramana ao Ankatso ( $PM = 32,75 \pm 0,77\%$ ) mihoatra amin'ny ao Mandraka ( $PM = 19,81 \pm 0,85\%$ ). Ny taham-pihazonan'ny hazo ny endriny dia nampiseho fa ny karazan-kazo Ambora, Lalona ary Angavo dia tsy mahatohitra ny fahasimbana mihatra amin'izy ireo ao amin'ny toeram-panandramana ao Mandraka mitaha amin'ny ao Ankatso. Ny fahasimbana amin'ny ankapobeny dia voafetra amin'ny fiovan'ny lokon'ny hazo sy ny fisian'ny holatra ho tompon'antoka amin'ny fahapotehan'ny hazo. Ny lamim-pitomboan'ny faharetana ara-boajanaharin'ny hazo dia tsy mitovy ho an'ireo toeram-panandramana roa. Kanefa ny karazan-kazo *Cedrela odorata* no simba indrindra mihoatra ireo karazan-kazo hafa. Hita fa misy fifandraisana miiba sy tena matanjaka eo amin'ny fahaverezan-danja sy ny fihenana ara-tangentialy. Ny fifandraisana misy eo amin'ny fahaverezan-danja'ny hazo sy ny fihenana ara-hadiry dia miiba sy matanjaka. Matanjaka sy miabo kosa izany eo amin'ny fihenana ara-tangentialin'ny hazo sy ny taham-pihazonan'ny hazo ny endriny. Ireo vokam-pikarohana ireo dia azo raisina ho fototra ho an'ny tohin'ny asa fanandramana. Ny fametrahana ity fikarohana ity dia azo raisina ho modely ho entina mampivelatra ny fahalalana mahakasika ny faharetana ara-boajanaharin'ny hazo eto Madagasikara. Ho an'ity fikarohana ity dia ilaina ny fanaraha-maso isaky ny enim-bolana ary ny fampitomboana ny fahalalana mifandraika amin'ny faharetana ara-boajanaharin'ny hazo toa ny « extractibles » sy ny « lignine ».

Teny fototra : hazo, Madagasikara, faharetana ara-boajanahary, toetoetra fizika, tompon'antoka amin'ny fahapotehan'ny hazo



## SOMMAIRE

REMERCIEMENTS .....	i
PRESENTATION DU PARTENAIRE .....	ii
RESUME.....	iii
ABSTRACT.....	iv
FAMINTINANA.....	v
Liste des tableaux.....	viii
Liste des figures .....	viii
Liste des photos.....	ix
Liste des cartes .....	x
Liste des équations .....	x
Liste des annexes.....	x
Partie 1. INTRODUCTION.....	1
Partie 2. ETAT DE L'ART.....	3
2.1. Généralités sur le bois .....	3
2.1.1. Matériau bois.....	3
2.1.2. Composition chimique du bois.....	4
2.2. Propriétés technologiques du bois.....	4
2.2.1. Durabilité naturelle.....	5
2.2.2. Agents de dégradation du bois et les formes de destruction .....	5
2.2.3. Méthode d'évaluation de la durabilité naturelle.....	9
2.2.4. Classes d'emploi du bois.....	9
Partie 3. METHODOLOGIE.....	11
3.1. Problématique et hypothèses.....	11
3.2. Matériels d'étude.....	12
3.3. Sites d'expérimentation.....	13
3.4. Conduite de l'expérimentation .....	15
3.4.1. Obtention des éprouvettes d'expérimentation .....	15
3.4.2. Répartition des éprouvettes dans les deux stations d'essai .....	17
3.4.3. Extraction des éprouvettes en fin d'essai .....	17

3.5.	Vérification des hypothèses de recherche .....	18
3.5.1.	Cas de l'hypothèse 1 .....	18
3.5.2.	Cas de l'hypothèse 2 .....	20
3.5.3.	Cas de l'hypothèse 3 .....	20
3.5.4.	Analyse de la variance pour déterminer l'effet site et l'effet espèce sur la durabilité naturelle	22
3.5.5.	Etude de corrélation pour vérifier la relation entre la durabilité naturelle et les propriétés physiques.....	22
3.6.	Méthodologie de recherche .....	24
3.7.	Résumé méthodologique .....	26
Partie 4.	<b>RESULTATS</b> .....	27
4.1.	Effets du site sur la durabilité naturelle.....	27
4.1.1.	Perte de masse .....	27
4.1.2.	Indice de conservation.....	28
4.2.	Effets du facteur espèce sur la durabilité naturelle.....	36
4.2.1.	Perte de masse des espèces étudiées par site .....	36
4.2.2.	Indice de conservation.....	38
4.3.	Influence des propriétés physiques sur la durabilité naturelle.....	39
4.3.1.	Corrélation entre les paramètres de propriétés physiques et la perte de masse .....	40
4.3.2.	Corrélation entre les paramètres de propriétés physiques et l'indice de conservation ..	40
Partie 5.	<b>DISCUSSIONS et RECOMMANDATIONS</b> .....	42
5.1.	Discussions.....	42
5.1.1.	Discussions sur la méthodologie .....	42
5.1.2.	Discussions sur les résultats .....	44
5.1.3.	Vérification des hypothèses de recherche .....	49
5.2.	Recommandations .....	50
5.2.1.	Recommandations sur la méthodologie de recherche .....	50
5.2.2.	Recommandations pratiques issues de la recherche.....	50
Partie 6.	<b>CONCLUSION</b> .....	56
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	57
	<b>ANNEXES</b> .....	I

## Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Classes d'emploi du bois et les agents biologiques d'altération</i> .....	10
<i>Tableau 2 : Liste des espèces étudiées</i> .....	13
<i>Tableau 3 : Données comparatives des stations</i> .....	13
<i>Tableau 4 : Nombre d'éprouvettes par espèce disposé dans chaque station</i> .....	17
<i>Tableau 5 : Grille d'évaluation de la durabilité naturelle selon la perte de masse</i> .....	19
<i>Tableau 6 : Principe d'identification de l'indice de conservation et d'évaluation de la durabilité naturelle à travers l'importance des dégâts observés</i> .....	19
<i>Tableau 7: Appréciation de l'intensité de corrélation</i> .....	23
<i>Tableau 8 : Cadre opératoire de la méthodologie de recherche</i> .....	24
<i>Tableau 9 : Manifestation de la dégradation du bois dans les deux sites d'étude</i> .....	30
<i>Tableau 13 : Evaluation de la durabilité naturelle par la perte de masse selon Beauchêne</i> .....	37
<i>Tableau 14 : Ordre de durabilité croissante du bois des espèces dans chaque station selon la classe de durabilité relative à la perte de masse</i> .....	38
<i>Tableau 15 : Evaluation de la durabilité naturelle par l'indice de conservation selon EDLUND et al. (2006)</i> .....	39
<i>Tableau 16 : Ordre de durabilité croissante du bois des espèces dans chaque station selon l'indice de conservation</i> .....	39
<i>Tableau 10 : Valeurs des propriétés physiques mesurées</i> .....	40
<i>Tableau 11 : Corrélation entre les propriétés physiques et la perte de masse</i> .....	40
<i>Tableau 12 : Corrélation entre les propriétés physiques et l'indice de conservation</i> .....	41
<i>Tableau 17 : Durabilité du bois des espèces selon la recherche et la bibliographie</i> .....	46
<i>Tableau 18 : Cadre logique</i> .....	52

## Liste des figures

<i>Figure1 : Couches constitutives du bois</i> .....	3
<i>Figure2 : Section transversale de bois de Santal de Madagascar</i> .....	3
<i>Figure3 : Axes d'anisotropie du bois</i> .....	4
<i>Figure4 : Principe de l'usinage</i> .....	16
<i>Figure 5 : Schéma méthodologique</i> .....	26
<i>Figure 6 : Représentation des moyennes de perte de masse (PM) pour les échantillons dans les deux stations</i> .....	27
<i>Figure 7 : Perte de masse (PM) pour les espèces des deux stations</i> .....	28
<i>Figure 8 : Indice de Conservation (IC) pour les échantillons dans les deux stations</i> .....	28
<i>Figure 9 : Indice de conservation (IC) pour les espèces des deux stations</i> .....	29

<i>Figure 10 : Perte de masse moyenne (PM) pour chaque espèce disposée à Ankatso.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 11 : Perte de masse moyenne (PM) pour chaque espèce disposée à Mandraka.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure 12 : Indice de conservation moyenne (IC) pour chaque espèce disposée à Ankatso .....</i>	<i>38</i>

## **Liste des photos**

<i>Photo 1 : Bleuissement sur grume de Virola, en Guyane .....</i>	<i>6</i>
<i>Photo 2 : Planche attaquée par la pourriture cubique .....</i>	<i>6</i>
<i>Photo 3 : Pourriture fibreuse .....</i>	<i>7</i>
<i>Photo 4 : Pourriture molle sur poteau enterré de Brosimum utile traité après 7 ans d'exposition.....</i>	<i>7</i>
<i>Photo 5 : Section de galerie de coléoptères Cérambycides sur du Manilkara, en Guyane .....</i>	<i>8</i>
<i>Photo 6 : Galerie de termite du genre Nasutitermes.....</i>	<i>8</i>
<i>Photo 7 : Enceinte climatique .....</i>	<i>16</i>
<i>Photo 8 : Terrains d'essai à Ankatso (a) et à Mandraka (b).....</i>	<i>17</i>
<i>Photo 9 : Eprouvette intacte (a) et éprouvette dégradée pour l'espèce Ambora à Ankatso (b).....</i>	<i>30</i>
<i>Photo 10 : Etat du bois de l'espèce Ambora à Mandraka.....</i>	<i>30</i>
<i>Photo 11 : Noircissement des éprouvettes de l'espèce Angavo à Mandraka .....</i>	<i>31</i>
<i>Photo 12 : Modification de la couleur de l'espèce Angavo à Ankatso.....</i>	<i>31</i>
<i>Photo 13 : Début de pourriture fibreuse sur le bois de Cedrela odorata à Ankatso .....</i>	<i>32</i>
<i>Photo 14 : Dégradation du bois de l'espèce Cedrela odorata à Mandraka par un noircissement (a) et une présence de plaques blanches (b).....</i>	<i>32</i>
<i>Photo 15 : Eprouvette intacte (a) et dégradée (b) de l'espèce Lalona à Ankatso .....</i>	<i>33</i>
<i>Photo 16 : Noircissement du bois de l'espèce Lalona à Mandraka.....</i>	<i>33</i>
<i>Photo 17 : Changement de couleur (a) et traces blanches sur le bois de l'espèce Valanirana à Ankatso (b).....</i>	<i>33</i>
<i>Photo 18 : Modification en noire de la couleur du bois de Valanirana à Mandraka.....</i>	<i>33</i>
<i>Photo 19 : Présence de feutrage blanchâtre (a) et noircissement (b) du bois de l'espèce Dipaty à Ankatso .....</i>	<i>34</i>
<i>Photo 20 : Arrhenia sp (a) et Amylostereum (b) sur le bois de l'espèce Dipaty à Mandraka .....</i>	<i>34</i>
<i>Photo 21 : Pourriture fibreuse et coloration en noire du bois de Felamborona à Ankatso .....</i>	<i>34</i>
<i>Photo 22 : Noircissement (a) et présence de champignon du genre Hypoxylon (b) sur le bois du Felamborona à Mandraka .....</i>	<i>34</i>
<i>Photo 23 : Discoloration du bois de l'espèce Kijy à Ankatso .....</i>	<i>35</i>
<i>Photo 24 : Noircissement du bois de l'espèce Kijy à Mandraka.....</i>	<i>35</i>

## Liste des cartes

<i>Carte 1 : Localisation du terrain d'expérimentation à Mandraka</i> .....	14
<i>Carte 2 : Localisation du terrain d'expérimentation à Ankatso</i> .....	15

## Liste des équations

<i>Équation 1 : Calcul de la perte de masse</i> .....	18
<i>Équation 2 : Calcul de la masse à PSF avant l'essai</i> .....	18
<i>Équation 3 : Calcul du pourcentage de la masse à 12% dans la masse à PSF</i> .....	18
<i>Équation 4 : Calcul de l'infradensité</i> .....	21
<i>Équation 5 : Calcul de la densité du bois</i> .....	21
<i>Équation 6 : Calcul du retrait radial</i> .....	21
<i>Équation 7: Calcul du retrait tangentiel</i> .....	21
<i>Équation 8 : Calcul du retrait volumique</i> .....	21
<i>Équation 9 : Calcul du coefficient de rétractabilité</i> .....	22

## Liste des annexes

<i>Annexe 1 : Disposition des éprouvettes au niveau des deux stations</i> .....	I
<i>Annexe 2 : Résultats de l'ANOVA sur la comparaison de la perte de masse au niveau échantillon</i> .....	II
<i>Annexe 3 : Résultats de l'ANOVA sur la comparaison de la perte de masse au niveau espèce</i> .....	II
<i>Annexe 4 : Résultats de l'ANOVA sur la comparaison de l'indice de conservation au niveau échantillon</i> .....	III
<i>Annexe 5 : Résultats de l'ANOVA sur la comparaison de l'indice de conservation au niveau espèce</i> . III	
<i>Annexe 6 : Durée de vie du bois selon la classe de durabilité d'après Beauchêne en 2006</i> .....	IV
<i>Annexe 7 : Inventaire des agents d'altération du bois</i> .....	IV

# INTRODUCTION

## Partie 1. INTRODUCTION

Le bois est un matériau très utilisé dans le monde. Ce fut de tout temps une des matières premières les plus importantes et les plus employées (CAMPREDON et ROL, 1931). La demande ne cesse d'augmenter d'autant plus que les grandes évolutions économiques mondiales et européennes montrent qu'il existe une croissance des besoins en bois (GUINARD, 2004). Au niveau mondial, un accroissement des extractions est constaté depuis les dernières décennies avec une quantité de 3,4 milliards de m<sup>3</sup> par an (FAO, 2010). Ceci concerne le bois rond industriel et le bois de feu. Pour le cas de Madagascar, la consommation annuelle de bois s'élève jusqu'à 21,7 millions de m<sup>3</sup> avec un taux de 80% affecté à l'énergie domestique et un taux de 20% correspondant aux bois de construction, bois d'œuvre et bois de service (MEYERS et *al.*, 2006).

La connaissance de toutes les propriétés du bois de chaque espèce est capitale pour pouvoir l'utiliser de manière durable. Chaque espèce se singularise par ses qualités technologiques qui la rendent apte à des utilisations spécifiques (CAMPREDON et ROL, 1931). La connaissance de la durabilité du bois est un facteur important pour son utilisation finale pour les constructions intérieures ou extérieures, c'est-à-dire sa résistance face à l'attaque des agents d'altération du bois (IRBE et *al.*, 2012).

À Madagascar, l'utilisation du bois sous différentes formes s'est développée depuis une trentaine d'années (RAKOTOVAO et *al.*, 2012). Mais les connaissances sur les propriétés du bois restent insuffisantes. Pourtant, le pays dispose de plusieurs types de forêts à savoir les forêts tropicales humides (4 700 430 ha), les forêts sèches (3 027 505 ha) et les forêts épineuses (1 756 884 ha) (MEYERS et *al.*, 2006 ; RAJEMISON, 2013). Les capitaux forestiers offrent également un large choix sur les espèces ligneuses (environ 4220) dont les potentiels de valorisation sont méconnus (MEF, 2009). Malgré cette richesse, l'exploitation ne se concentre que sur quelques espèces. L'offre en diversité sur le marché est restreinte car seule une cinquantaine d'essence est exploitée (RAKOTOVAO et *al.*, 2012).

En 2006, une étude a montré un excédent de 1,9 millions de m<sup>3</sup> entre la production et la consommation du bois à Madagascar. Cependant, celui-ci ne peut plus subvenir à partir de l'année 2010 à cause d'un déficit annuel en bois pouvant atteindre les 4 millions de m<sup>3</sup> en 2025 (MEYERS et *al.*, 2006). Les exploitations irrationnelles figurent parmi les principaux facteurs directs de la réduction de la couverture forestière dans le pays (MEYERS et *al.*, 2006 ; RAJEMISON, 2013). C'est pourquoi une raréfaction des espèces surexploitées est constatée. Cette situation alarmante est due à un manque de savoir vis-à-vis des propriétés des bois malgaches alors qu'il s'agit des données les plus importantes pour pouvoir les valoriser de façon appropriée. Ainsi, la présente recherche intitulée « **Etude de la durabilité en service d'essences forestières de Mandraka en vue de déterminer leur groupe d'appartenance parmi les bois malgaches** » a été menée pour compléter les connaissances sur les bois à Madagascar. Il convient de fournir les meilleures recommandations sur l'utilisation adaptée à chaque espèce et de proposer des substitutions aux espèces qui subissent des pressions considérables. La question qui se

pose est alors : « **Qu'est ce qui conditionne la durabilité naturelle du bois soumis à la classe d'emploi 4 ?** » c'est-à-dire une utilisation du bois en extérieure, au contact direct avec les agents d'altération.

Le travail se présente sous quatre grandes parties. La première partie parle de l'état de l'art ou l'état des connaissances par rapport au sujet d'étude. Ensuite, la seconde partie concerne la méthodologie de recherche utilisée. La troisième partie se focalise sur les résultats traités. Enfin, la dernière partie parle successivement de la discussion et des recommandations pour se terminer par une conclusion.



# ETAT de l'ART

## Partie 2. ETAT DE L'ART

### 2.1. Généralités sur le bois

#### 2.1.1. Matériau bois

L'arbre, un organisme végétal appartenant à l'embranchement des phanérogames est principalement constitué de bois (PIGNOLET, 2008). Il existe deux catégories d'essences ligneuses à savoir les feuillus pour les angiospermes et les résineux pour les gymnospermes. La présente recherche s'intéresse à l'étude de feuillus. Une coupe transversale du bois permet de distinguer plusieurs couches concentriques (Figures 1, 2).

De l'intérieur vers l'extérieur sont observés successivement :

- La **moelle** située dans la partie centrale ;
- Le **duramen** ou bois parfait ou xylème secondaire formé essentiellement par des cellules mortes lignifiées. Pour certaines espèces présentant un bois à aubier différencié, le duramen est de couleur nettement distincte à cause de la présence de tannins et de colorants ;
- L'**aubier** ou bois imparfait constitué par des couches de cellules non encore lignifiées ;
- La **couche périphérique** comprenant le cambium qui est l'assise génératrice du bois, les tissus conducteurs (liber) par lesquels circulent la sève élaborée et l'écorce.

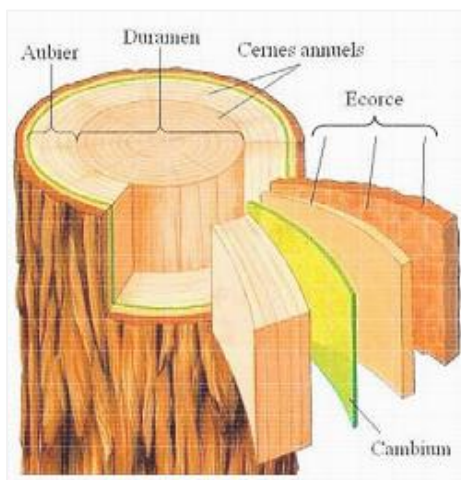


Figure1 : Couches constitutives du bois

Source : PIGNOLET, 2008

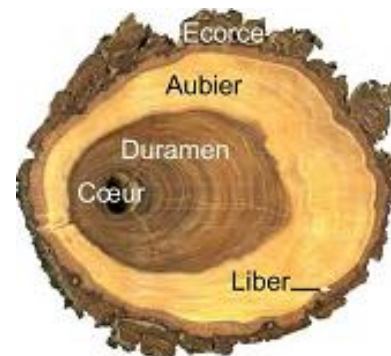


Figure2 : Section transversale de bois de Santal de Madagascar

Source : RAKOTOVAO et al., 2012

Le bois est caractérisé par son anisotropie et son hygroscopicité. Concernant l'anisotropie, le bois comprend trois axes orthogonaux à savoir l'axe tangentiel (T) qui est tangent aux cernes annuels, l'axe radial (R) en suivant la direction de croissance (cernes) et l'axe longitudinal (L) qui est parallèle à l'axe du tronc. Suivant ces axes, l'agencement cellulaire se trouve différent (Figure 3).

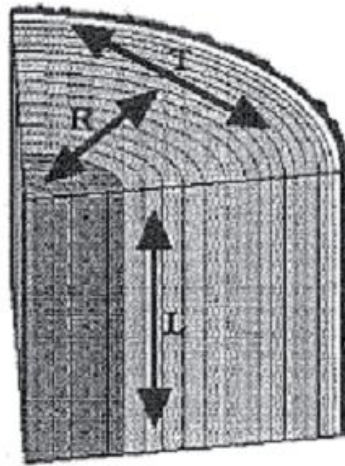


Figure 3 : Axes d'anisotropie du bois  
Source : DINH, 2012

Le bois est hygroscopique car son humidité peut varier en fonction de la température et de l'humidité auxquelles le matériau est soumis, c'est-à-dire en fonction des conditions climatiques où il se trouve. Le bois peut atteindre une humidité limite appelée point de saturation des fibres (PSF) où les parois cellulaires sont saturées en eau. Celui-ci est souvent proche de 30% (DINH, 2012). Des retraits suivant les 3 directions d'anisotropie commencent à s'observer pour des valeurs d'humidité en dessous du PSF (CLAIR, 2001).

L'anisotropie du retrait a pour conséquence la déformation du bois qui peut aussi conduire à la formation de fentes sur de grandes longueurs (EL ALAMI, 2013). Elles faciliteront ainsi la pénétration d'humidité ainsi que des organismes d'altération du bois.

### 2.1.2. Composition chimique du bois

Le bois est formé principalement par 3 molécules à savoir la cellulose (40-60%), les hémicelluloses (25-30%) et la lignine (25-30%). La lignine est censée améliorer la durabilité du bois contre l'attaque microbienne par le revêtement et la protection des microfibrilles de cellulose (IRBE et al., 2012).

Il existe également d'autres molécules à savoir l'amidon et les extractibles tels que les terpènes, les cires, les résines, les composés phénoliques, les composés inorganiques (PIGNOLET, 2008). Ces derniers sont de nature différente et de quantité variable selon l'espèce. Ils peuvent présenter des caractéristiques antifongiques et contribuent ainsi à la résistance du bois. Ce sont surtout les extractibles qui peuvent favoriser ou non la durabilité du bois, c'est-à-dire que leur présence conditionne aussi la durabilité naturelle.

## 2.2. Propriétés technologiques du bois

L'utilisation du bois dépend essentiellement de ses propriétés technologiques qui peuvent varier d'une essence à une autre. Ces propriétés se regroupent en deux catégories : la première concerne les propriétés physico-mécaniques (densité, PSF, retraits, dureté, module d'élasticité...) et la seconde la durabilité

(GERARD et al., 1998). Les propriétés physiques et mécaniques des bois ont été les plus étudiées à Madagascar (GUENEAU et al., 1969 ; CAILLIEZ et GUENEAU, 1972). Par conséquent, il convient d'apporter plus d'informations sur la durabilité naturelle.

### **2.2.1. Durabilité naturelle**

Le bois, étant de la matière organique, est susceptible d'être dégradé par une diversité d'organismes. (SUNDARARAJ et al., 2015). Dans cette optique, la norme EN 350-1 (1994) définit la durabilité naturelle comme étant la résistance intrinsèque du bois aux attaques des organismes destructeurs. Cette capacité du bois est mesurée en l'absence de traitement physique ou chimique. Les principaux agents qui attaquent le bois sont les microorganismes (bactéries), les champignons, les insectes ainsi que les mollusques et crustacés marins (BEAUCHENE, 2006).

En se référant à l'aptitude du bois à résister aux attaques des agents d'altération, la durabilité naturelle est catégorisée en cinq classes (GERARD et al., 1998) : la classe 1 ou classe très durable, la classe 2 ou classe durable, la classe 3 ou classe moyennement durable, la classe 4 ou classe peu durable et la classe 5 ou classe non durable.

### **2.2.2. Agents de dégradation du bois et les formes de destruction**

#### **2.2.2.1. Bactéries**

Les bactéries telles que *Burkholderia sp.* Ellin ou *Oxalicibacterium faecigallinarum* (PREWITT et al., 2014) attaquent le bois en absence d'oxygène c'est-à-dire quand le bois est saturé en eau. Cependant, la dégradation est très lente par rapport à l'œuvre des champignons (BEAUCHENE, 2006).

#### **2.2.2.2. Champignons**

Les champignons quant à eux s'attaquent au bois en présence permanente d'une certaine humidité, d'oxygène et d'une température favorable (FOUQUET, 2003). Le bois est le plus exposé aux champignons pour une humidité entre 35 et 40%. La température optimale pour les attaques fongiques se situe entre 20 et 35°C (BEAUCHENE, 2006). Il existe deux catégories de champignon, d'une part les champignons lignicoles et d'autre part les champignons lignivores (FORTIN et POLIQUIN, 1974).

Les champignons lignicoles provoquent :

- une dépréciation de l'esthétique du bois par un simple changement de couleur (bleuissement, brune, rouge et queue de vache) ;
- une altération d'ordre physique et mécanique par la destruction des constituants de la paroi cellulaire qui se manifeste par l'apparition d'échauffures (taches blanchâtres et flammes noirâtres).



*Photo 1 : Bleuissement sur grume de Virola, en Guyane*  
Source : FOUQUET, 2003

Par contre, les champignons lignivores ou xylophages décomposent la cellulose et/ou la lignine du bois. Les attaques sont plus connues sous le nom de :

- pourriture fibreuse ou blanche (Photo 3) provoquée par la destruction de la lignine, de la cellulose et de l'hémicellulose ;
- pourriture cubique ou brune (Photo 2) résultant de la destruction de la cellulose et de l'hémicellulose ;
- pourriture molle par la dénaturation de la cellulose et de la lignine (Photo 4).

Les pourritures blanches et brunes sont causées par des champignons appartenant au groupe des basidiomycètes et la pourriture molle est causée par des ascomycètes.



*Photo 2 : Planche attaquée par la pourriture cubique*  
Source : FRAITURE, 2008



*Photo 3 : Pourriture fibreuse*  
Source : CLESSE, 2008



*Photo 4 : Pourriture molle sur poteau enterré de Brosimum utile traité après 7 ans d'exposition*  
Source : BEAUCHENE, 2006

### 2.2.2.3. Insectes

#### *Insectes xylophages*

Les insectes xylophages se nourrissent du bois surtout à l'état larvaire. Le bois leur sert d'hôte et de nourriture. Il s'agit de piqûre noire quand les attaques se font sur les bois frais à cause d'un mycélium noir qui recouvre les galeries et de piqûre blanche sur bois secs. Les adultes peuvent aussi être xylophages mais les dégâts sont les plus importants au stade larvaire. Les insectes concernés sont principalement les coléoptères (Scolyte, Lyctus, Platype, Bostryche...).



*Photo 5 : Section de galerie de coléoptères Cérambycides sur du Manilkara, en Guyane*

Source : FOUQUET, 2003

### **Insectes xylophiles**

Les insectes xylophiles ou nidificateurs ne se nourrissent pas du bois mais s'en servent comme habitat en creusant des galeries. Ce sont essentiellement des hyménoptères comme les abeilles charpentières ou les fourmis.

#### **2.2.2.4. Termites**

Les termites sont très redoutables dans la dégradation du bois dans les pays tropicaux. Ils vivent en colonie et creusent de vrais tunnels à l'intérieur du bois. Il existe des termites de bois sec et des termites souterrains qui sont lucifuges et qui ont des besoins en eau plus importants.



*Photo 6 : Galerie de termite du genre Nasutitermes*

Source : FOUQUET, 2003



#### 2.2.2.5. *Térébrants marins*

Les térébrants marins sont des agents d'altération qui s'attaquent à tous les ouvrages en bois au contact des eaux de mer et des eaux saumâtres. Ils engendrent de lourds dégâts en s'introduisant à l'intérieur du bois à l'état larvaire pour y vivre de manière définitive (FOUQUET, 2003).

Pour les essais de champs dans le cas de cette étude, il n'est pas possible d'isoler ces différents agents, ainsi, les dégradations sont les fruits de toutes les actions des agents d'altération du bois sauf les térébrants marins.

#### 2.2.3. *Méthode d'évaluation de la durabilité naturelle*

Il existe diverses procédures pour évaluer la durabilité naturelle du bois et les produits dérivés du bois. Mais en principe, elles se divisent en deux groupes à savoir l'essai de champ et l'essai au laboratoire (MEYER, 2013).

L'essai au laboratoire consiste à mettre directement les bois en contact avec des souches cultivées (champignons, termites) dans des conditions contrôlées. L'essai de champ concerne l'exposition du bois au contact de différentes sources de contamination à savoir le sol, l'air et les intempéries (RAKOTOVAO *et al.*, 2012).

L'expérimentation de champ est la plus adaptée à Madagascar, notamment pour cette étude vue l'absence de laboratoire spécialisé pour étudier la durabilité naturelle, des infrastructures ainsi que des intrants nécessaires pour la conduite d'essai en laboratoire. De plus, la grande île présente une grande diversité de climats en fonction des localités considérées.

Concernant l'essai de champ, il existe la norme française EN 252 (1989) qui consiste à enterrer des éprouvettes de dimension 500mm x 50mm x 25mm à mi-hauteur dans le sol et espacées de 300 mm afin d'évaluer leur capacité de résistance à la dégradation. Cette norme valide l'utilisation d'un seul terrain d'essai mais propose également la sélection de deux voire plusieurs terrains pour une étude comparative. Dans cette optique, la présente étude considère deux stations d'expérimentation à savoir les hauts plateaux à Antananarivo et le versant oriental à Mandraka. L'effet du site sur la dégradation du bois sera déterminé.

#### 2.2.4. *Classes d'emploi du bois*

Les propriétés propres au bois jouent un rôle important sur sa durabilité mais aussi les conditions auxquelles il sera mis en service à savoir l'humidité, la température et la présence des agents d'altération (LARSSON-BRELID *et al.*, 2011), ce qui introduit à la notion de classes d'emploi du bois. Selon la norme EN 335-1 (2007), il existe cinq classes d'emploi qui correspondent aux différentes situations en service auxquelles peuvent être exposés le bois et les produits à base de bois (Tableau 1).



Tableau 1 : Classes d'emploi du bois et les agents biologiques d'altération

Classe d'emploi	Situation générale en service	Description de l'exposition à l'humidification en service	Agents biologiques	
1	A l'intérieur, sous abri	Sec, maximum 20%	Coléoptères foreurs du bois	En cas de présence possible de termites cette classe est désignée 1T
2	A l'intérieur ou sous abri	Occasionnellement > 20%	Comme ci-dessous	En cas de présence possible de termites cette classe est désignée 2T
3	3.1 A l'extérieur, au-dessus du sol, protégé	Occasionnellement > 20%	+ Champignons de discoloration	En cas de présence possible de termites cette classe est désignée 3.1T ou 3.2T
	3.2 A l'extérieur, au-dessus du sol, non protégé	Fréquemment > 20%	+ Champignons de pourriture	
4	4.1 A l'extérieur, en contact avec le sol et/ou l'eau douce	A prédominance ou en permanence > 20%	Comme ci-dessus + Champignons de Pourriture molle	En cas de présence possible de termites cette classe est désignée 4.1T ou 4.2T
	4.2 A l'extérieur, en contact avec le sol (sévère) et/ou l'eau douce	En permanence > 20%		
5	Dans l'eau salée	En permanence > 20%	Champignons de pourriture	A Térédinidés Limnoria
			Champignons de Pourriture molle	B comme en A + Limnoria tolérant à la créosote
			Térébrants marins	C comme en B + Pholades

Source : NF EN 335-1 et 2, 2007

La classe d'emploi 4 qui servira de référence pour cette étude de la durabilité naturelle concerne le contact permanent du bois avec le sol. L'humidité du bois est toujours supérieure à 20%. Le bois se trouve ainsi exposé à tous les risques de dégradation à savoir l'attaque des champignons lignivores et des insectes.

# METHODOLOGIE

## Partie 3. METHODOLOGIE

### 3.1. Problématique et hypothèses

La valorisation du bois est étroitement liée à la connaissance de toutes ses propriétés. L'utilisation des bois tropicaux pourrait être améliorée et accrue par l'accessibilité à toutes ces connaissances (FORTIN et POLIQUIN, 1974). Principalement, la détermination de la classe d'emploi du bois suivant la connaissance de la durabilité présente une importance économique et une issue pour une meilleure valorisation du capital forestier (SUNDARARAJ *et al.*, 2015).

A Madagascar, des études ont été menées sur la détermination des caractéristiques physico-mécaniques du bois (CAILLIEZ et GUENEAU, 1972 ; GUENEAU *et al.*, 1969). Cependant, l'information sur la durabilité peut rendre très différente l'appréciation du bois (CAILLIEZ et GUENEAU, 1972). L'ouvrage « Atlas bois de Madagascar » par RAKOTOVAO *et al.* (2012) considère à la fois les propriétés physiques, mécaniques et la durabilité du bois de 187 espèces forestières malgaches. Autrement dit, environ 4,5% des essences forestières malgaches disposent de données en matières de propriétés technologique de leur bois.

Les études effectuées sur quelques essences forestières à Mandraka par RAFIDIMANANTSOA (2013) et ARITSARA (2015) ne traitent que quelques propriétés physico-mécaniques. Ainsi, les informations sur la durabilité restent très restreintes et n'ont pas été considérées dans leurs travaux de recherche. A Madagascar, l'exploitation du bois est régie par un diamètre minimal d'exploitabilité (DME) de 40 cm conformément à la loi en vigueur. Il s'agit d'une norme sylvicole qui permet le développement de la régénération. Pour les espèces à croissance lente, il faut plusieurs années pour atteindre le DME. Ainsi, des améliorations génétiques s'imposent. C'est pourquoi, en plus des propriétés physico-mécaniques, il est obligatoire de connaître la durabilité naturelle du bois pour une meilleure gestion de l'exploitation dans le remplacement des ouvrages en bois en extérieur. De plus, les conditions environnementales de dégradation des bois dans les pays tropicaux comme Madagascar sont très sévères (MOYA *et al.*, 2014) et méritent d'être étudiées afin de mieux argumenter sur l'utilisation du bois. Dans ce sens, la problématique qui se pose est : « **Qu'est ce qui conditionne la durabilité naturelle du bois soumis à la classe d'emploi 4 ?** ».

Afin de mieux conduire la recherche, il convient d'apporter des réponses aux questions suivantes :

- Quelle est l'influence des conditions du milieu (climat, caractéristiques du sol, les agents d'altération) sur la durabilité naturelle du bois ? Autrement dit, est ce que la durabilité du bois dépend de l'endroit/site où il a été mis en service ?
- Est-ce que la durabilité des essences est toujours gardée même en faisant varier les conditions stationnelles où elles sont soumises ? Autrement dit, est-ce qu'une espèce plus durable par rapport à d'autres dans une station l'est toujours dans l'autre station ?
- Quelle est la relation entre les propriétés physiques (densité, les retraits, PSF) et la durabilité naturelle ?

Trois hypothèses ont été avancées pour fournir des réponses à ces questions :

- **Hypothèse 1** : Les conditions stationnelles à Mandraka favorisent une dégradation plus sévère du bois par rapport à celles d'Ankatso (Antananarivo)
- **Hypothèse 2** : La durabilité naturelle du bois d'une espèce par rapport à une autre est maintenue dans les deux stations
- **Hypothèse 3** : La durabilité naturelle du bois dépend de ses propriétés physiques

### 3.2. Matériels d'étude

RAFIDIMANANTSOA (2013) a effectué une étude sur plusieurs espèces autochtones dans la station de Mandraka. Le choix de sept espèces autochtones a été basé sur une valeur de l'infradensité, en ayant choisi les espèces avec une infradensité supérieure à 0,5. Il s'agit d'une propriété qui est influencée par la structure anatomique et les métabolites du bois. Selon TRAORE (2008), l'infradensité est positivement corrélée avec la teneur en extrait et la proportion des fibres.

Par ailleurs, seule la durabilité de trois espèces est actuellement connue à savoir *Tambourissa trichophylla* Baker (Ambora) qui est très durable (RAKOTOVAO et al., 2012) et moyennement durable (LEMMENS et al., 2008) ; *Weinmannia rutenbergii* (Lalona) qui est très durable (RAKOTOVAO et al., 2012) et *Neotina isoneura* (Radlk.) Capuron (Felamborona) qui est moyennement à peu durable (RAKOTOVAO et al., 2012) et durable (LEMMENS et al., 2008). De plus, la formation végétale dans la station de Mandraka est caractérisée par une série écologique de *Weinmannia* et de *Tambourissa*.

En outre, il est à noter que la sélection a également considéré l'abondance d'individus propres à une coupe ainsi que la disponibilité de régénération. D'ailleurs, lors de la collecte des grumes, le diamètre moyen est de 10 cm. Cette valeur a été prise pour ne pas prendre des arbres de trop grande taille qui peuvent faire l'objet d'une exploitation ultérieure pour la construction au cours des aménagements ni de trop petite taille afin d'obtenir des éprouvettes d'essai sans aubier (non durable).

Une espèce introduite a aussi été prise comme matériel d'étude. Il s'agit de l'espèce *Cedrela odorata* qui est un feuillu originaire du Nord de Mexique et en abondance dans la station de Mandraka. Elle a été choisie du fait qu'elle s'adapte bien aux conditions du milieu. Sa plantation date de 1951 et elle constitue un peuplement naturalisé à partir de l'année 1986 (ROBISOA, 2008). De plus, son bois est le plus utilisé par les habitants, pour leur propre besoin et pour l'aménagement du site. Le bois de *Cedrela odorata* est moyennement durable (VAN DER HOUT, 2015 ; BLASER et al., 1993).

En somme, les matériels d'étude sont constitués par sept espèces autochtones et une espèce introduite (Tableau 2).

Tableau 2 : Liste des espèces étudiées

Noms scientifiques	Noms vernaculaires	Familles
<i>Agauria sp</i>	Angavo	ERICACEAE
<i>Bosqueia danguyana Leandri</i>	Dipaty	MORACEAE
<i>Cedrela odorata</i>	Cedrela, Cedro	MELIACEAE
<i>Garcinia sp.</i>	Kijy	CLUSIACEAE
<i>Neotina isoneura (Radlk.) Capuron</i>	Felamborona	SAPINDACEAE
<i>Nuxia capitata</i>	Valanirana	STILBACEAE
<i>Tambourissa trichophylla Baker</i>	Ambora	MONIMIACEAE
<i>Weinmannia rutenbergii</i>	Lalona	CUNONIACEAE

### 3.3. Sites d'expérimentation

Deux stations présentant des conditions environnementales et climatiques différentes ont été choisies pour cette étude. Elles se singularisent par leur climat (température, hygrométrie, pluviométrie), les paramètres pédologiques (type, température et humidité du sol) et les agents biologiques de dégradation du bois. Les données climatiques et pédologiques correspondent à une période de six mois, de Novembre 2015 en Avril 2016.

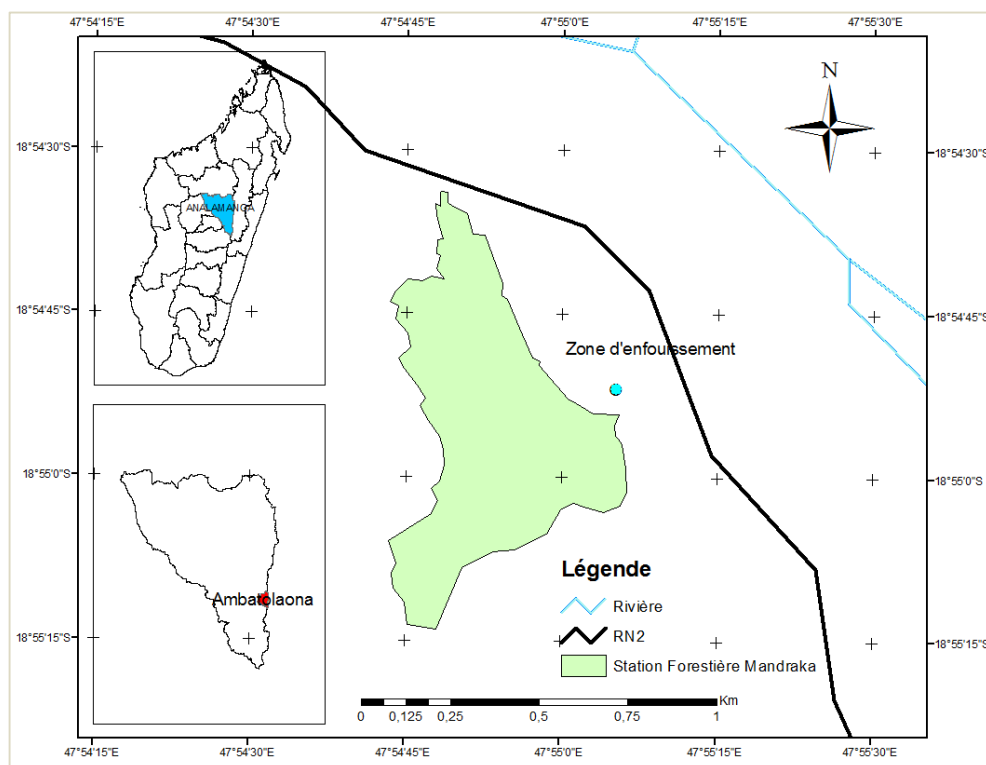
Principalement, l'hygrométrie, la pluviométrie et l'humidité sont élevées dans la station de Mandraka par rapport à la station d'Ankatso.

Tableau 3 : Données comparatives des stations

Paramètres environnementaux	Stations	
	Mandraka	Ankatso
Coordonnées géographiques	18°54'43,7"S et 47°55'10,5"E	18°54'35,44''S et 47°33'22,85''E
Situation géographique	65 km d'Antananarivo en suivant la RN2 qui mène vers Toamasina (Carte 1)	Campus Universitaire d'Ankatso (Carte 2)
Altitude	1300m	1286m
Climat	Tropical humide frais (RAJOELISON et al., 2007)	Tropical d'altitude (MAEP, 2003)
Température moyenne	22,93°C	24,95°C
Hygrométrie	77,06%	63,8%

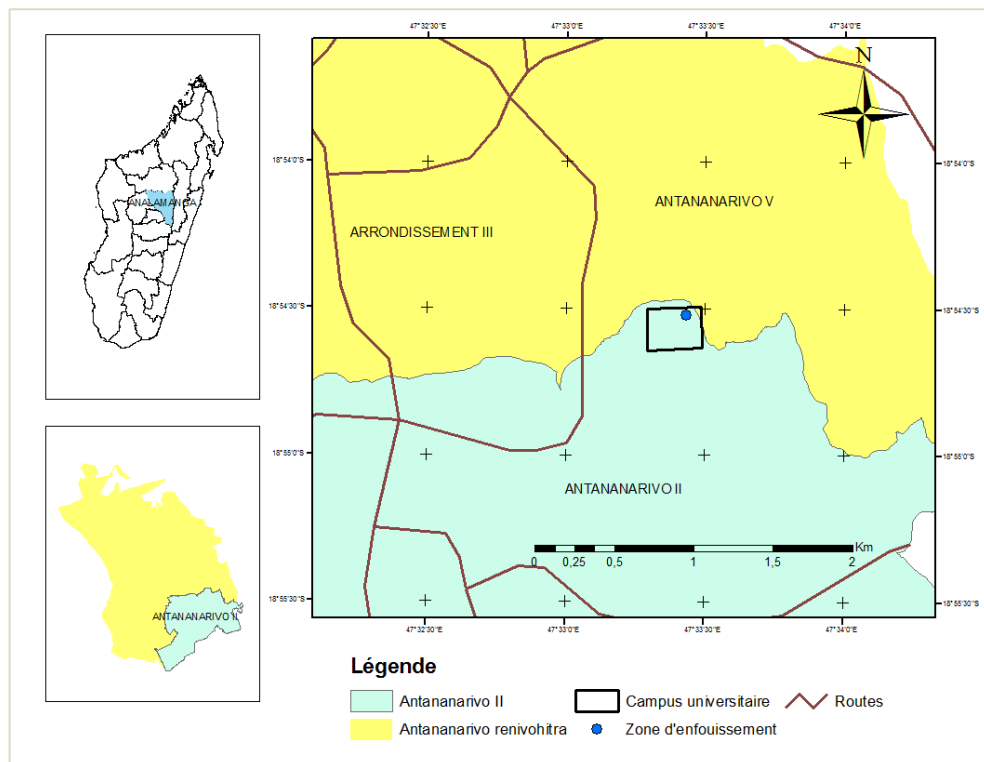
(Suite tableau 3)

Paramètres environnementaux	Stations	
	Mandraka	Ankatso
Pluviométrie	1660,7mm	1145,65mm
Type de sol	Sol ferrallitique rajeuni à texture argilo-limoneuse	Sol ferrallitique à texture sablo-argileuse
Température du sol	20,78°C	20,35°C
Humidité du sol	34,35%	22,6%
Agents biologiques d'altération	-Polyporoïdes lignivores, Agaricoïdes lignivores, Tremelles, champignons clavaires responsables de pourriture blanche -Larves d'insectes xylophages et insectes xylophiles (blattes, hyménoptères, fourmis...) -Termites (RANDRIANOELY, 2015)	-Résupinés du genre <i>Ceriporia</i> , <i>Ceriporiopsis</i> , <i>Hyphoderma</i> responsables de pourriture fibreuse -Larves xylophages, insectes xylophiles (fourmis, blattes...) (Annexe 7)



Source : BD 500 et Google Earth, 2016

Carte 1 : Localisation du terrain d'expérimentation à Mandraka



Source : BD 500 et Google Earth, 2016

Carte 2 : Localisation du terrain d'expérimentation à Ankato

### 3.4. Conduite de l'expérimentation

Cette étude se base sur un essai de champ conduit au niveau des deux stations Mandraka et Ankato pour une durée de 6 mois, de Novembre 2015 en Avril 2016.

#### 3.4.1. Obtention des éprouvettes d'expérimentation

Selon la norme EN 252 (1989), la dimension des éprouvettes est de  $(500 \pm 1\text{mm}) \times (50 \pm 0,3\text{mm}) \times (25 \pm 0,3\text{mm})$ . Six (06) pieds d'arbres par espèce ont été sélectionnés. Les bois ont été prélevés au ras du sol jusqu'à une hauteur de 2 m. Les sections RT choisies lors de l'usinage sont celles qui présentent des cernes orientées à l'une des faces de 50mm avec une tolérance de  $\pm 15^\circ$  (Figure 4).

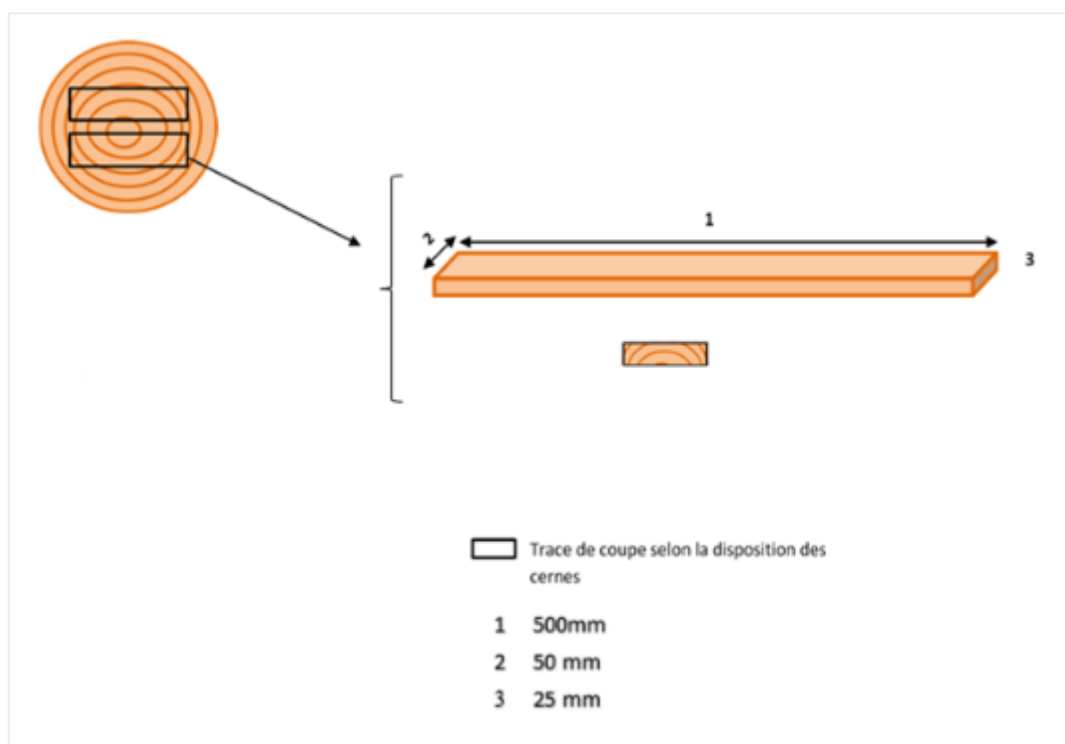


Figure4 : Principe de l'usinage

Source : SOLOFOFIAVIANTSOA, 2016

Toutes les éprouvettes obtenues ont fait l'objet d'un conditionnement et d'un pesage avant l'expérimentation. Elles ont été disposées dans une enceinte climatique (Photo 7) à 20°C et à 65% d'humidité pour ramener le bois à une humidité d'équilibre relative de 12% qui est une référence utilisée pour le calcul des propriétés physico-mécaniques du bois (FCBA, 2012)



Photo 7 : Enceinte climatique

Source : SOLOFOFIAVIANTSOA, 2016



### 3.4.2. Répartition des éprouvettes dans les deux stations d'essai

Après conditionnement, les éprouvettes ont été soumises à la classe d'emploi 4 dans les stations de Mandraka et d'Ankatso selon les directives de la norme EN 252 (1989), c'est-à-dire à mi-hauteur et selon un espacement de 300mm (Photo 8).



Photo 8 : Terrains d'essai à Ankatso (a) et à Mandraka (b)  
Source : SOLOFOFIAVIANTSOA, 2016

Les échantillons ont été constitués selon le nombre d'éprouvettes obtenues après usinage (Tableau 4).

Tableau 4 : Nombre d'éprouvettes par espèce disposé dans chaque station

Nom scientifique	Nom vernaculaire	Nombre d'éprouvettes par station
<i>Agauria sp</i>	Angavo	3
<i>Bosqueia danguyana Leandri</i>	Dipaty	10
<i>Cedrela odorata</i>	<i>Cedrela odorata</i>	10
<i>Garcinia sp.</i>	Kijy	7
<i>Neotina isoneura (Radlk.) Capuron</i>	Felamborona	6
<i>Nuxia capitata</i>	Valanirana	9
<i>Tambourissa trichophylla Baker</i>	Ambora	6
<i>Weinmannia rutenbergii</i>	Lalona	6

### 3.4.3. Extraction des éprouvettes en fin d'essai

Après six mois d'exposition aux conditions environnementales des deux stations, les éprouvettes ont été extraites et les dégâts ont été évalués c'est-à-dire la perte de masse et l'importance des dégâts visibles. Une identification de certains champignons observés sur les éprouvettes a été possible grâce à la coopération avec le Centre National de Recherche sur l'Environnement (CNRE). L'identification a été basée sur une confrontation des principaux caractères morphologiques observés sur le spécimen frais avec ceux des espèces connues et traitées dans les ouvrages de référence. Les échantillons ont également été photographiés.

### 3.5. Vérification des hypothèses de recherche

#### 3.5.1. Cas de l'hypothèse 1

L'hypothèse 1 stipule que : « **Les conditions stationnelles à Mandraka favorisent une dégradation plus sévère du bois par rapport à celles d'Ankatso (Antananarivo)** ».

##### 3.5.1.1. Détermination des valeurs des indicateurs

Il convient de déterminer la valeur des indicateurs perte de masse et indice de conservation pour vérifier cette première hypothèse.

##### Mesure de la perte de masse des éprouvettes

L'utilisation de la perte de masse correspond à une évaluation quantitative de la durabilité naturelle. Selon RAKOTOSOLONIAINA (2013), la perte de masse pour chaque éprouvette se détermine par la différence en pourcentage entre la masse de l'éprouvette avant et après le test.

Les masses considérées dans cette étude ont été les masses à l'état saturé des éprouvettes avant et après l'expérimentation (Equation 1).

$$PM (\%) = \frac{MPSFi - MPSFf}{MPSFi} \times 100$$

Équation 1 : Calcul de la perte de masse

*MPSFi* et *MPSFf* représentent respectivement la masse à PSF avant l'essai et la masse à PSF après l'essai.

*MPSFi* est déterminée selon la relation :

$$MPSFi = \frac{M12\%}{\%mPSF} \times 100$$

Équation 2 : Calcul de la masse à PSF avant l'essai

*M12%* représente la masse à 12% de chaque éprouvette de dimension 500mm x 50mm x 25mm obtenue après conditionnement. *%mPSF* correspond au pourcentage de masse à 12% dans la masse à PSF de petites éprouvettes de dimension 30mm x 50mm x 25mm.

$$\%mPSF = \frac{m12\%}{mPSF} \times 100$$

Équation 3 : Calcul du pourcentage de la masse à 12% dans la masse à PSF

*MPSFf* est la masse directement pesée après l'extraction des éprouvettes à la fin de l'expérimentation.

Selon BEAUCHENE (2006), il existe cinq catégories de durabilité en fonction du pourcentage de la perte de masse (Tableau 5)

Tableau 5 : Grille d'évaluation de la durabilité naturelle selon la perte de masse

Perte de masse (%)	Etat de durabilité naturelle
] 0 ; 5 [	Très durable
[5 ; 10[	Durable
[10 ; 20 [	Moyennement durable
[20 ; 30[	Peu durable
Supérieure à 30 %	Non durable

Source : BEAUCHENE, 2006

**Détermination de l'indice de conservation**

L'évaluation de la dégradation s'effectue lors de l'extraction hors du sol de toutes les éprouvettes. Les données collectées ont été les dégâts retenus par observation visuelle. Il s'agit d'une méthode d'évaluation qualitative de la durabilité naturelle mise au point par EDLUND et *al.* (2006) en se référant à la norme EN 252 (1989). Des notes de 0 à 4 ont alors été attribuées à chaque éprouvette en fonction de son état et il existe une correspondance avec l'indice de conservation (Tableau 6). Cinq classes de durabilité existent également en fonction de l'indice de conservation.

Tableau 6 : Principe d'identification de l'indice de conservation et d'évaluation de la durabilité naturelle à travers l'importance des dégâts observés

Notation	Classification des dégâts observés	Etat de l'échantillon testé	Indice de conservation (%)	Indice de conservation d'un lot d'éprouvette (%)	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	[100 ; 90[	Très durable
1	Faible	Echantillon très légèrement attaqué qui ne comporte qu'un simple changement de la couleur et une dégradation superficielle se traduisant par la formation de trous de profondeur très inférieure à 1 mm	90	[90 ; 75[	Durable
2	Moyenne	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	[75 ; 50[	Moyennement durable

Notation	Classification des dégâts observés	Etat de l'échantillon testé	Indice de conservation (%)	Indice de conservation d'un lot d'éprouvette (%)	Etat de la durabilité naturelle
3	Forte	Dégradation sévère caractérisée soit par la présence de trous de 3 à 5mm 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	[50 ; 25[	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	[25; 0 [	Non durable

Source : EN 252, 1989 ; EDLUND et *al.*, 2006

### 3.5.1.2. Conditions de vérification de l'hypothèse 1

L'hypothèse 1 est vérifiée s'il existe une différence significative entre les indicateurs perte de masse et indice de conservation à Mandraka et ceux d'Ankatso et que la dégradation dans la première station est plus importante.

### 3.5.2. *Cas de l'hypothèse 2*

L'hypothèse 2 affirme que : « **La durabilité naturelle du bois d'une espèce par rapport à une autre est maintenue dans les deux stations** ».

#### 3.5.2.1. Détermination des indicateurs

L'indicateur à déterminer pour la vérification de l'hypothèse 2 est l'ordre de durabilité croissante des espèces pour chaque station.

#### 3.5.2.2. Condition de vérification de l'hypothèse 2

L'hypothèse 2 est vérifiée si et seulement si l'ordre de durabilité croissante est identique pour les deux stations d'expérimentation.

### 3.5.3. *Cas de l'hypothèse 3*

L'hypothèse 3 stipule que « **La durabilité naturelle du bois dépend de ses propriétés physiques** ».

#### 3.5.3.1. Détermination des valeurs des indicateurs

Les indicateurs pris en compte pour sa vérification ont été : l'infradensité, la densité à 12%, les retraits (radial, tangentiel, volumique), la perte de masse des éprouvettes et l'importance des dégâts observés.

Afin de déterminer les trois premiers indicateurs susmentionnés, des éprouvettes de dimension 30mm x 50mm x 25mm ont été utilisées. La perte de masse et l'indice de conservation ont déjà été obtenus dans la vérification de l'hypothèse 1.

### Mesure de l'infradensité

L'infradensité a été obtenue par la relation suivante :

$$Id = \frac{M0/Vs}{\rho_{eau}}$$

Équation 4 : Calcul de l'infradensité

**M0** est la masse anhydre des éprouvettes et **Vs** est le volume saturé après immersion dans l'eau pour une durée de 2 à 4 jours. Le volume a été obtenu par la méthode de poussée d'Archimède (DAYA et BOUDAIA, 2015).  **$\rho_{eau}$**  est la masse volumique de l'eau qui est de 1g.cm-3.

### Mesure de la densité

La densité d'un échantillon de bois a été obtenue par le rapport entre sa masse volumique à 12% d'humidité et la masse volumique de l'eau.

$$D12 = \frac{\rho_{bois}}{\rho_{eau}}$$

Équation 5 : Calcul de la densité du bois

Le volume du segment de bois a été obtenu en utilisant la méthode de poussée d'Archimède (DAYA et BOUDAIA, 2015).

### Mesure des retraits radial, tangentiel, volumique et du coefficient de rétractabilité

Les retraits ont été déterminés selon la norme NF B51-006 (1985). Les retraits radial, tangentiel et volumique ont été donnés par les équations 6, 7 et 8. Le retrait longitudinal n'a pas été considéré car il s'exprime en très faible valeur.

$$Rr (\%) = \frac{LRS - LR0}{LRS} \times 100$$

Équation 6 : Calcul du retrait radial

$$Rt (\%) = \frac{LTS - LT0}{LTS} \times 100$$

Équation 7: Calcul du retrait tangentiel

**LRS** et **LTS** sont les dimensions, en millimètres, de l'éprouvette à l'état saturé respectivement dans le sens radial et tangentiel. **LR0** et **LT0** sont les dimensions, en millimètres, de l'éprouvette à l'état anhydre après étuvage à 103°C.

$$Rv (\%) = \frac{Vs - Vo}{Vs} \times 100$$

Équation 8 : Calcul du retrait volumique

$V_s$  et  $V_o$  Volume, en centimètres cubes, de l'éprouvette à l'état saturé et à l'état anhydre.

Le coefficient de rétractabilité volumique définit la nervosité du bois. Le paramètre se détermine par le rapport entre le retrait volumique et le PSF du bois (Equation 9).

$$Crv = Rv / PSF$$

Équation 9 : Calcul du coefficient de rétractabilité

### **Mesure du PSF**

Le PSF a été déterminé par une méthode graphique. Il est donné par l'ordonnée à l'origine de la droite de régression linéaire ( $y = ax+b$ ) entre les humidités proches de 18%, 12%, 6%, 0% et les dimensions des éprouvettes y afférentes. Il s'agit de l'humidité extrapolée pour laquelle le retrait est nul. Il est ainsi exprimé en pourcentage (RAKOTOVOLOLONALIMANANA, 2013).

#### **3.5.3.2. Conditions de vérification de l'hypothèse 3**

L'hypothèse 3 est vérifiée s'il existe une corrélation :

- négative entre la perte de masse et la densité, positive entre l'indice de conservation et la densité ;
- positive entre la perte de masse et les retraits, négative entre l'indice de conservation et les retraits ;
- positive entre la perte de masse et le coefficient de rétractabilité, négative entre l'indice de conservation et le coefficient de rétractabilité;
- positive entre la perte de masse et le PSF ; négative entre la perte de masse et l'indice de conservation

#### ***3.5.4. Analyse de la variance pour déterminer l'effet site et l'effet espèce sur la durabilité naturelle***

L'analyse a débuté par un test de normalité des données car l'analyse de la variance n'est valable que si les données suivent une distribution normale au seuil de signification de 5%. L'ANOVA correspond à une comparaison des moyennes appliquée aux moyennes de la perte de masse et aux moyennes de l'indice de conservation. Combiné avec le test de Tuckey (HSD), l'ANOVA permet de vérifier si :

- la différence entre les indicateurs de durabilité (perte de masse et indice de conservation) entre les deux stations est significative ou non ;
- la différence entre les indicateurs de durabilité pour chaque espèce dans chaque station est significative ou non

#### ***3.5.5. Etude de corrélation pour vérifier la relation entre la durabilité naturelle et les propriétés physiques***

Le type de traitement utilisé est le test de corrélation de Pearson dans le cas où la distribution suit une loi normale. Dans le cas contraire, le test non paramétrique de Spearman sera choisi.

Il s'agit de déterminer si les paramètres densité, retraits, coefficient de rétractabilité et PSF sont corrélés avec la perte de masse et l'indice de conservation. Une corrélation est dite positive si la valeur du coefficient de corrélation l'est aussi. Dans ce cas, les valeurs des variables à tester augmentent ou diminuent simultanément et de façon proportionnelle. Elle est par contre qualifiée de négative si le coefficient prend une valeur négative.

L'intensité de la corrélation peut être appréciée par le coefficient de corrélation R (BOSQUET, 2006).

*Tableau 7: Appréciation de l'intensité de corrélation*

<b>Valeurs du coefficient de corrélation R</b>	<b>Intensité de corrélation</b>
] -0,5 ; 0,5[	Absence ou très faible corrélation
] -0,7 ; -0,5[ ou ] 0,5 ; 0,7[	Corrélation faible
] -0,8 ; -0,7[ ou ] 0,7 ; 0,8 [	Corrélation modérée
] -0,9 ; -0,8[ ou ] 0,8 ; 0,9[	Corrélation forte
] -1 ; -0,9[ ou ] 0,9 ; 1[	Corrélation très forte

Source : BOSQUET, 2006

### 3.6. Méthodologie de recherche

Tableau 8 : Cadre opératoire de la méthodologie de recherche

Problématique	Hypothèses	Sous-hypothèses	Indicateurs	Méthodologie
<p><b>Qu'est ce qui conditionne la durabilité naturelle du bois soumis à la classe d'emploi 4 ?</b></p>	<p>H1 : Les conditions stationnelles à Mandraka favorisent une dégradation plus sévère du bois par rapport à celles d'Ankatso (Antananarivo)</p>		<p>Perte de masse et indice de conservation</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Usinage d'éprouvettes de dimension 500mmx50mmx25mm pour les 8 espèces selon la norme EN252 (1989)</li> <li>-Conditionnent à 12% d'humidité de tous les lots d'éprouvettes et pesage</li> <li>-Soumission des grandes éprouvettes aux conditions du milieu à Mandraka et à Ankatso par enfouissement pendant 6 mois (Novembre-Avril)</li> <li>-Façonnage d'éprouvettes de dimension (30mm x 50mm x 20mm) avec 20 éprouvettes par espèce</li> <li>-Calcul de la masse initiale à PSF</li> <li>-Extraction des éprouvettes, pesage pour avoir la masse finale et évaluation des dégâts</li> <li>-Détermination des indicateurs perte de masse et indice de conservation</li> <li>-Comparaison des indicateurs entre les deux stations</li> </ul>



Problématique	Hypothèses	Sous-hypothèses	Indicateurs	Méthodologie
<p align="center"><b>Qu'est ce qui conditionne la durabilité naturelle du bois soumis à la classe d'emploi 4 ?</b></p>	<p>H2 : La durabilité naturelle du bois d'une espèce par rapport à une autre est maintenue dans les deux stations</p>		<p align="center">Ordre de durabilité croissante</p>	<p>-Etablissement de l'ordre de durabilité du bois des espèces pour chaque station -Confrontation des résultats</p>
	<p>H3 : La durabilité naturelle du bois dépend de ses propriétés physiques</p>	<p>H3.1 : La durabilité naturelle est d'autant plus élevée que l'infradensité et la densité du bois sont grandes</p>	<p align="center">Perte de masse, indice de conservation, infradensité, densité</p>	<p>-Façonnage d'éprouvettes de dimension (30mm x 50mm x 20mm) avec 20 éprouvettes par espèce -Détermination des propriétés physiques densité, infradensité, retraits, coefficient de rétractabilité et PSF -Evaluation de la corrélation entre les valeurs des propriétés physiques et les indicateurs de durabilité (perte de masse, indice de conservation)</p>
		<p>H3.2 : Le bois des espèces à faible retrait sont durables</p>	<p align="center">Perte de masse, indice de conservation, retrait</p>	
		<p>H3.3 : Une valeur de PSF élevée influe négativement la durabilité</p>	<p align="center">Classe de durabilité et PSF</p>	
		<p>H3.4 : La durabilité du bois est d'autant plus faible qu'il présente un coefficient de rétractabilité élevé</p>	<p align="center">Perte de masse, indice de conservation, coefficient de rétractabilité</p>	

### 3.7. Résumé méthodologique

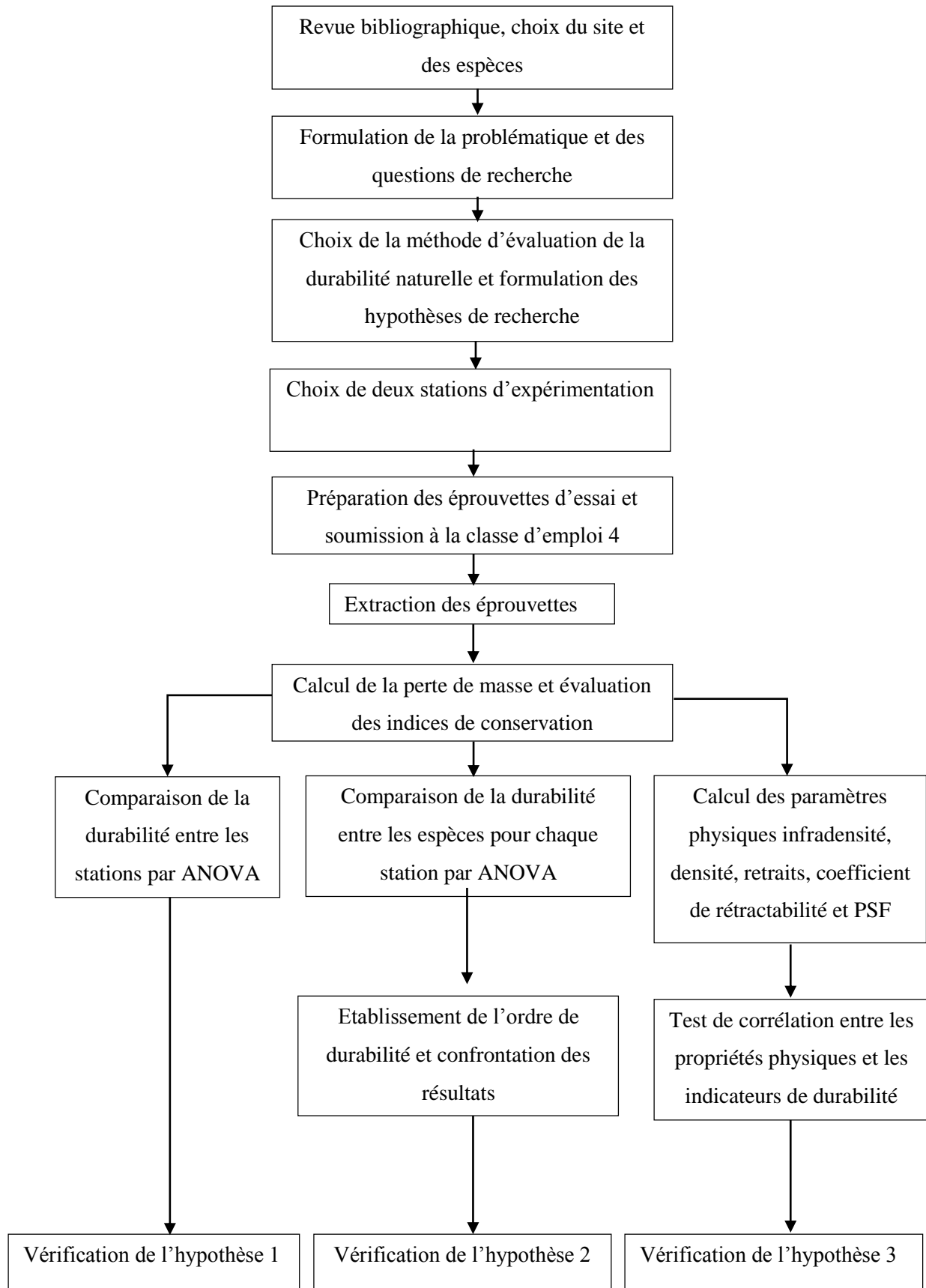


Figure 5 : Schéma méthodologique

# RESULTATS

## Partie 4. RESULTATS

### 4.1. Effets du site sur la durabilité naturelle

#### 4.1.1. Perte de masse

Pour l'ensemble des éprouvettes dans chaque station, le résultat de l'ANOVA montre qu'il existe une différence significative entre les pertes de masse pour les échantillons à Mandraka et ceux d'Ankatso (Figure 6). La perte de masse moyenne pour la station de Mandraka est de  $19,81 \pm 0,85\%$  et elle est de  $32,75 \pm 0,77\%$  pour la station d'Ankatso. Ainsi, les conditions du milieu à Mandraka sont moins favorables à la dégradation du bois que celles d'Ankatso.

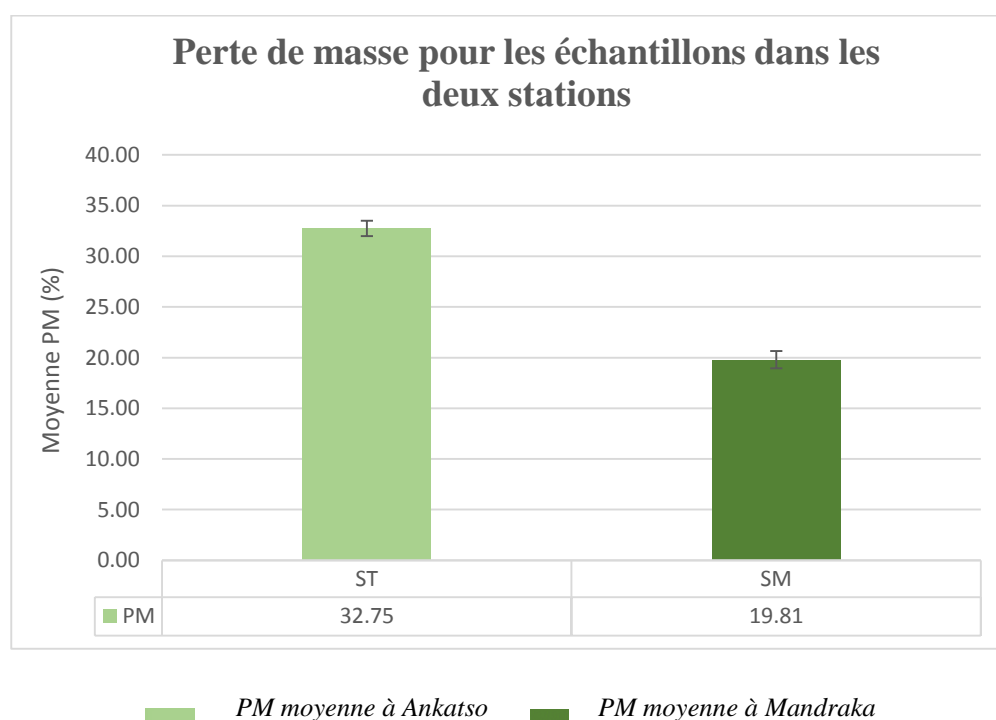
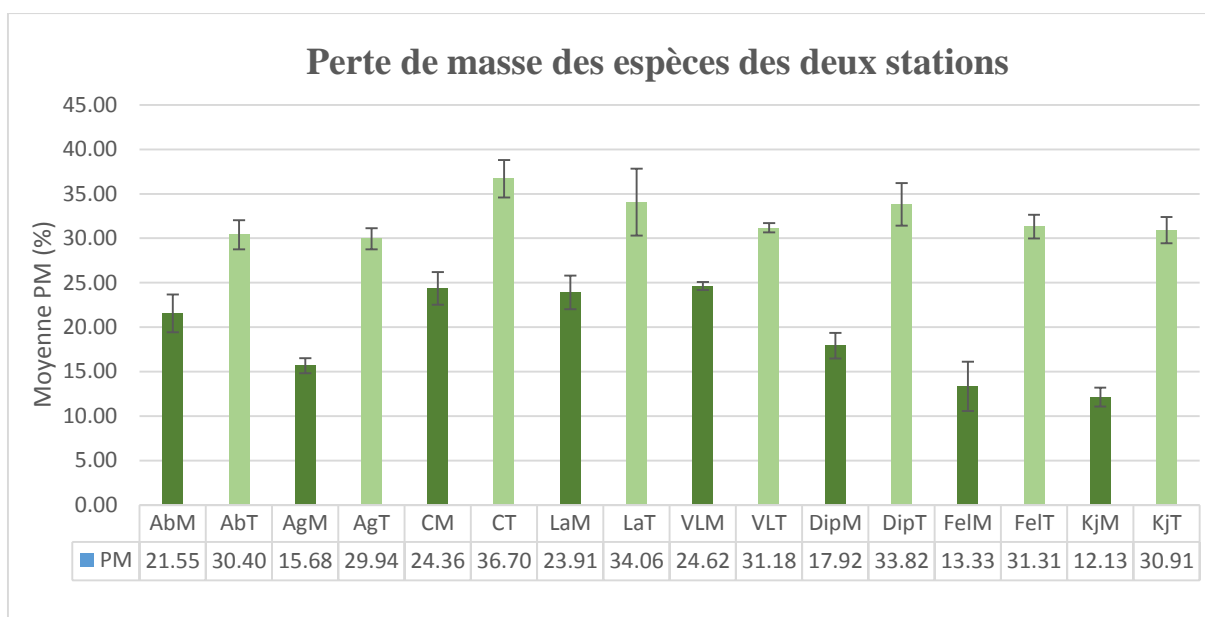


Figure 6 : Représentation des moyennes de perte de masse (PM) pour les échantillons dans les deux stations  
ST : Station d'Ankatso, SM : Station de Mandraka

En considérant les mêmes espèces dans les deux stations, le test de comparaison montre également un p-value inférieur au seuil de signification  $\alpha$  de 5%, ce qui confirme qu'il existe une différence significative entre la perte de masse des éprouvettes. Pour chacune des espèces étudiées, les éprouvettes disposées à Mandraka sont plus résistantes avec une perte de masse entre  $12,13\% \pm 1,06$  et  $24,62 \pm 0,45\%$  comparées à celles à Ankatso présentant une perte de masse entre  $29,94 \pm 1,18\%$  et  $36,7 \pm 2,11\%$  (Figure 7). Cela confirme que les conditions du milieu dans la station de Mandraka sont moins favorables à la dégradation du bois que celles d'Ankatso.



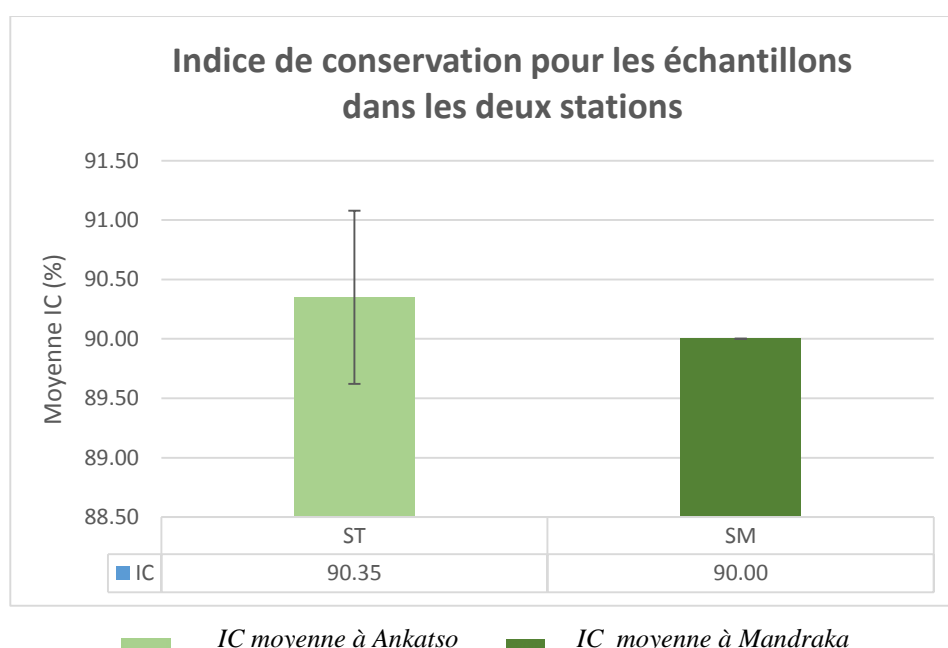
■ PM moyenne par espèce à Ankatso   
 ■ PM moyenne par espèce à Mandraka

*Figure 7 : Perte de masse (PM) pour les espèces des deux stations*

*AbM : Ambora Mandraka, AbT : Ambora Tanà, AgM : Angavo Mandraka, AgT : Angavo Tanà, CM : Cedrela Mandraka, CT : Cedrela Tanà, LaM : Lalona Mandraka, LaT : Lalona Tanà, VLM : Valanirana Mandraka, VLT : Valanirana Tanà, DipM : Dipaty Mandraka, DipT : Dipaty Tanà, FelM : Felamborona Mandraka, FelT : Felamborona Tanà, KjM : Kijy Mandraka, KjT : Kijy Tanà*

#### 4.1.2. Indice de conservation

Pour l'ensemble des éprouvettes dans chaque station, il n'existe pas de différence significative entre l'indice de conservation des éprouvettes des deux stations avec une moyenne de 90% pour Mandraka et de  $90,35 \pm 0,73\%$  pour Ankatso (Figure 8).



■ IC moyenne à Ankatso   
 ■ IC moyenne à Mandraka

*Figure 8 : Indice de Conservation (IC) pour les échantillons dans les deux stations  
 ST : Station d'Ankatso, SM : Station de Mandraka*

En considérant les mêmes espèces dans les deux stations, il existe une différence significative pour l'indice de conservation des espèces Ambora, Angavo, Cedrela et Lalona. Les éprouvettes de ces espèces sont moins conservées dans la station de Mandraka sauf pour le cas de l'espèce *Cedrela odorata* (Figure 9). Pour les autres espèces c'est-à-dire Valanirana, Dipaty, Felamborona et Kijy, il n'existe pas de différence significative entre l'indice de conservation des deux stations.

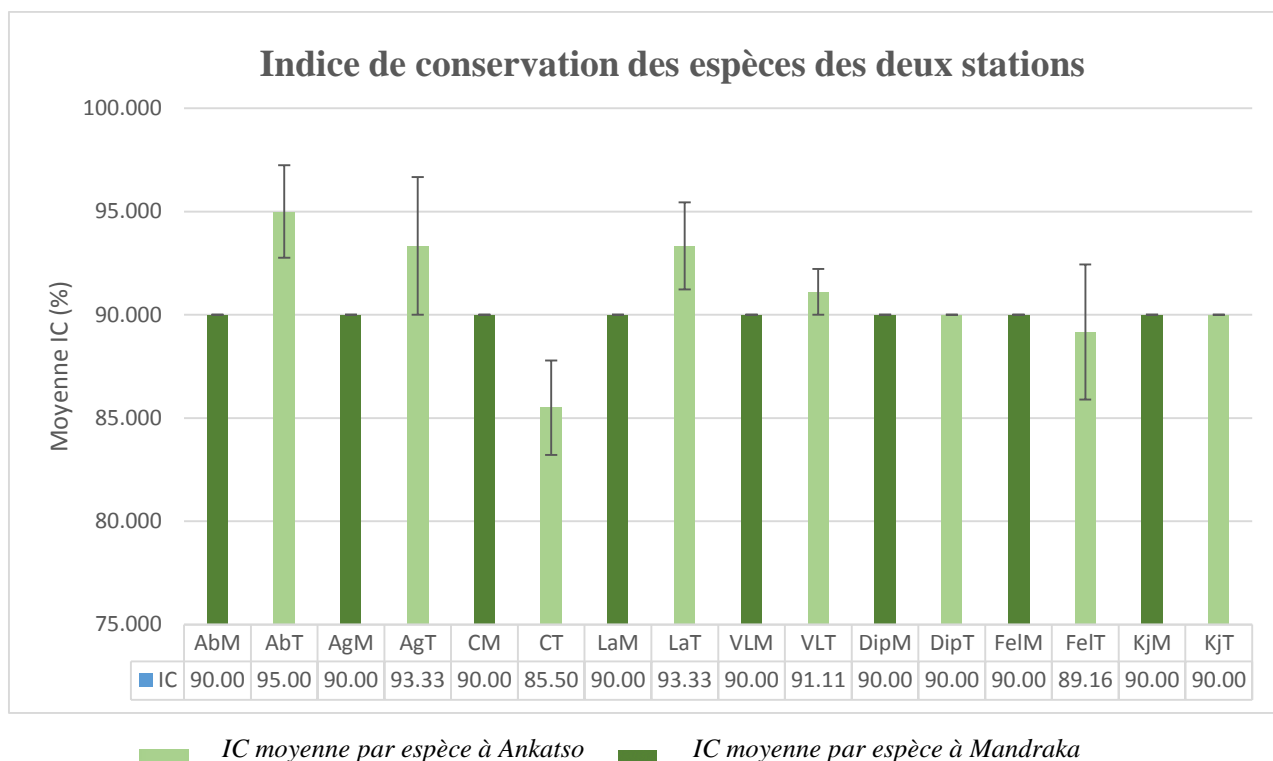






Figure 9 : Indice de conservation (IC) pour les espèces des deux stations

AbM : Ambora Mandraka, AbT : Ambora Tanà, AgM : Angavo Mandraka, AgT : Angavo Tanà, CM : Cedrela Mandraka, CT : Cedrela Tanà, LaM : Lalona Mandraka, LaT : Lalona Tanà, VLM : Valanirana Mandraka, VLT : Valanirana Tanà, DipM : Dipaty Mandraka, DipT : Dipaty Tanà, FelM : Felamborona Mandraka, FelT : Felamborona Tanà, KjM : Kijy Mandraka, KjT : Kijy Tanà



La dégradation observée se manifeste généralement par un changement de la couleur en noire ou en gris des éprouvettes soumises à l'expérimentation. Toutefois, un début de manifestation de pourriture blanche a été observé sur certaines éprouvettes disposées à Ankato. En outre, quelques-unes ont aussi été retrouvées intactes, cas des espèces Ambora et Lalona. Des champignons ont été identifiés dans la station de Mandraka à savoir *Arrhenia sp*, *Amylostereum* et le genre *Hypoxylon* (HAGORA et al., 2000 ; BERNICCHIA, 2005). Ils sont responsables de pourriture blanche.



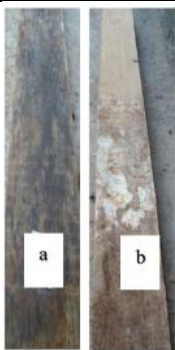

Tableau 9 : Manifestation de la dégradation du bois dans les deux sites d'étude


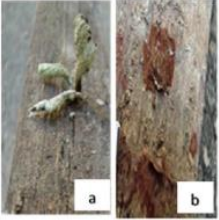


Espèces	Dégradation du bois à Ankatso		Dégradation du bois à Mandraka	
	Observations	Illustrations	Observations	Illustrations
<b>Ambora</b>	<p>-Existence d'éprouvettes intactes (Photo 9a)</p> <p>-Changement de la couleur du bois en noir (Photo 9b)</p>	 <p><i>Photo 9 : Epreuve intacte (a) et éprouvette dégradée pour l'espèce Ambora à Ankatso (b)</i></p>	<p>Changement de la couleur du bois en noir (Photo 10)</p>	 <p><i>Photo 10 : Etat du bois de l'espèce Ambora à Mandraka</i></p>

<p><b>Angavo</b></p>	<p>Changement de la couleur du bois en noire (Photo 11)</p>	 <p><i>Photo 11 : Noircissement des éprouvettes de l'espèce Angavo à Mandraka</i></p>	<p>Changement de la couleur du bois en noire (Photo 12)</p>	 <p><i>Photo 12 : Modification de la couleur de l'espèce Angavo à Ankatso</i></p>
----------------------	---	--	---	--



<p><b><i>Cedrela odorata</i></b></p>	<p>Manifestation de pourriture fibreuse et ramollissement atteignant les 2mm de profondeur (Photo 13)</p>	 <p><i>Photo 13 : Début de pourriture fibreuse sur le bois de Cedrela odorata à Ankatso</i></p>	<p>-Changement de la couleur du bois en noire (Photo 14a) -Plaques blanches (Photo 14b)</p>	 <p><i>Photo 14 : Dégradation du bois de l'espèce Cedrela odorata à Mandraka par un noircissement (a) et une présence de plaques blanches (b)</i></p>
--------------------------------------	---	--	---	--

<p><b>Lalona</b></p>	<p>-Existence d'éprouvettes intactes (Photo 15a) -Changement de la couleur du bois en noire et présence de traces blanches (Photo 15b)</p>	 <p><i>Photo 15 : Epreuve intacte (a) et dégradée (b) de l'espèce Lalona à Ankatso</i></p>	<p>Modification de la couleur du bois en noire (Photo 16)</p>	 <p><i>Photo 16 : Noircissement du bois de l'espèce Lalona à Mandraka</i></p>
<p><b>Valanirana</b></p>	<p>-Changement de la couleur du bois en noire et grise (Photo 17a) -Présence de traces blanches (Photo 17b)</p>	 <p><i>Photo 17 : Changement de couleur (a) et traces blanches sur le bois de l'espèce Valanirana à Ankatso (b)</i></p>	<p>Changement de la couleur du bois en noir (Photo 18)</p>	 <p><i>Photo 18 : Modification en noire de la couleur du bois de Valanirana à Mandraka</i></p>

<p><b>Dipaty</b></p>	<p>-Changement de la couleur du bois en noire (Photo 19b) -Présence de plaques blanches (Photo 19a)</p>	 <p>Photo 19 : Présence de feutrage blanchâtre (a) et noircissement (b) du bois de l'espèce Dipaty à Ankatso</p>	<p>-Changement de la couleur du bois en noire -Présence de champignons basidiomycètes responsables de pourriture blanche, <i>Arrhenia sp</i> (Photo 20a) et <i>Amylostereum</i> (Photo 20b)</p>	 <p>Photo 20 : <i>Arrhenia sp</i> (a) et <i>Amylostereum</i> (b) sur le bois de l'espèce Dipaty à Mandraka</p>
<p><b>Felamborona</b></p>	<p>-Début de manifestation de pourriture fibreuse (Photo 21a) -Changement de la couleur du bois en noire (Photo 21b)</p>	 <p>Photo 21 : Pourriture fibreuse et coloration en noire du bois de Felamborona à Ankatso</p>	<p>-Changement de la couleur du bois en noire (Photo 22a) -Présence de champignon responsable de pourriture blanche du genre <i>Hypoxylon</i>, (Photo 22b)</p>	 <p>Photo 22 : Noircissement (a) et présence de champignon du genre <i>Hypoxylon</i> (b) sur le bois du Felamborona à Mandraka</p>

<p><b>Kijy</b></p>	<p>Changement de la couleur du bois en noire et grise (Photo 23)</p>	 <p><i>Photo 23 : Discoloration du bois de l'espèce Kijy à Ankatso</i></p>	<p>Changement de la couleur du bois en noire (Photo 24)</p>	 <p><i>Photo 24 : Noircissement du bois de l'espèce Kijy à Mandraka</i></p>
--------------------	--	---	---	--

## 4.2. Effets du facteur espèce sur la durabilité naturelle

### 4.2.1. Perte de masse des espèces étudiées par site

Pour la station d'Ankatso, il n'existe pas de différence significative entre la perte de masse des espèces ( $p\text{-value} > 0,05$ ). La perte de masse la plus faible est de  $29,94 \pm 1,18\%$  correspondant à l'espèce *Angavo* et la perte de masse la plus élevée est attribuée à l'espèce *Cedrela odorata* de l'ordre de  $36,7 \pm 2,11\%$  (Figure 10).

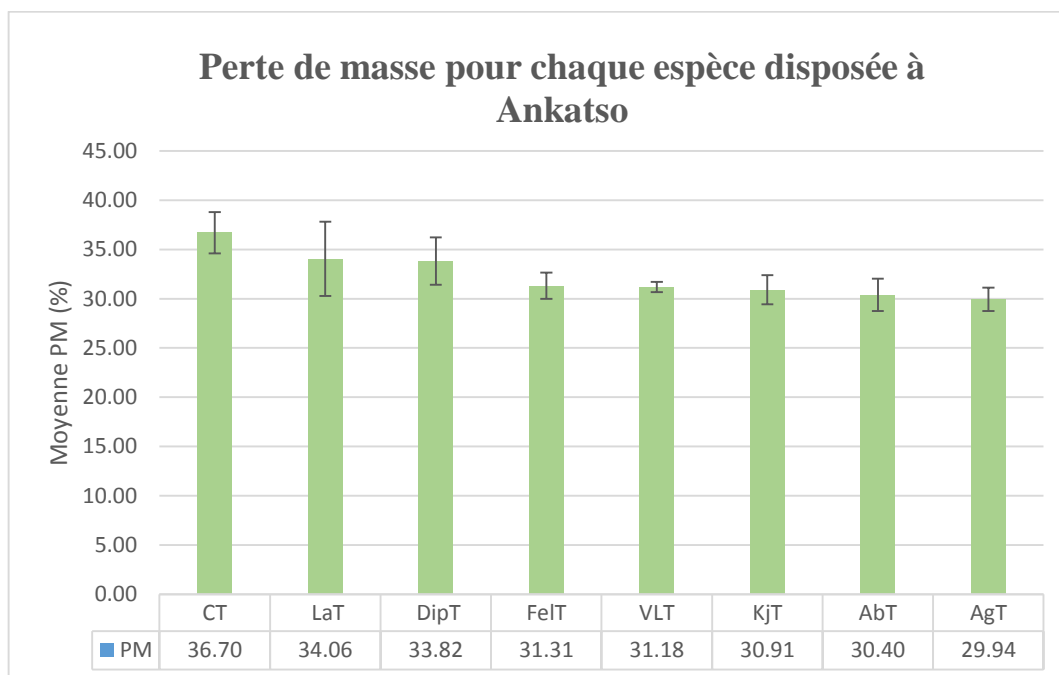


Figure 10 : Perte de masse moyenne (PM) pour chaque espèce disposée à Ankatso

AbT : *Ambora Tanà*, AgT : *Angavo Tanà*, CT : *Cedrela Tanà*, VLT : *Valanirana Tanà*, DipT : *Dipaty Tanà*, FelT : *Felamborona Tanà*, KJT : *Kijy Tanà*, LaT : *Lalona Tanà*

Pour la station de Mandraka, il existe une différence significative entre la perte de masse des espèces. *Valanirana* et *Cedrela* sont les espèces les moins résistantes face à la dégradation (Figure 11). Les espèces les plus résistantes sont *Felamborona* et *Kijy*.

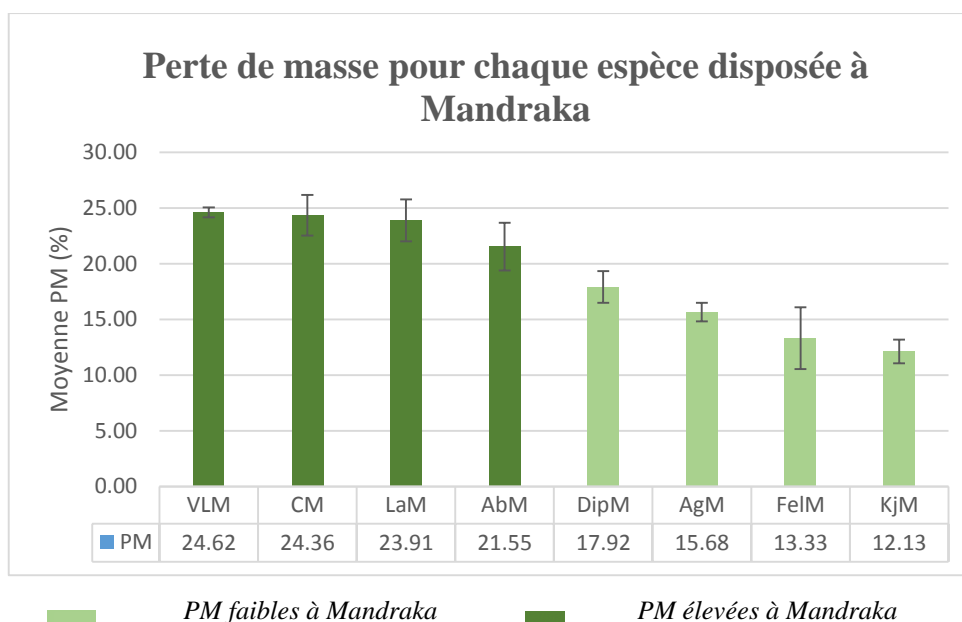


Figure 11 : Perte de masse moyenne (PM) pour chaque espèce disposée à Mandraka

AbM : Ambora Mandraka, AgM : Angavo Mandraka, CM : Cedrela Mandraka, VLM : Valanirana Mandraka, DipM : Dipaty Mandraka, FelM : Felamborona Mandraka, KJM : Kijy Mandraka, LaM : Lalona Mandraka

En se référant à la grille d'évaluation de Beauchêne, le bois des espèces disposées à Ankatso appartient à la classe non durable. Par contre pour la station de Mandraka, le bois des espèces Dipaty, Felamborona, Kijy et Angavo est moyennement durable. Le bois des espèces Cedrela, Lalona, Valanirana et Ambora est peu durable (Tableau 10).

Tableau 10 : Evaluation de la durabilité naturelle par la perte de masse selon Beauchêne

Site Essence	Ankatso		Mandraka	
	Durabilité selon la grille de Beauchêne	Classe de durabilité	Durabilité selon la grille de Beauchêne	Classe de durabilité
Cedrela	Non durable	5	Peu durable	4
Lalona	Non durable	5	Peu durable	4
Dipaty	Non durable	5	Moyennement durable	3
Felamborona	Non durable	5	Moyennement durable	3
Valanirana	Non durable	5	Peu durable	4
Kijy	Non durable	5	Moyennement durable	3
Ambora	Non durable	5	Peu durable	4
Angavo	Non durable	5	Moyennement durable	3

Ainsi, le tableau 11 résume la durabilité des espèces selon la classe de durabilité liée à la perte de masse pour chaque station par ordre croissant.

Tableau 11 : Ordre de durabilité croissante du bois des espèces dans chaque station selon la classe de durabilité relative à la perte de masse

Durabilité croissante des espèces à Ankatso selon la perte de masse	Durabilité croissante des espèces à Mandraka selon la perte de masse
Même classe de durabilité pour les 8 espèces	Valanirana, Cedrela, Lalona, Ambora
	Dipaty, Angavo, Felamborona, Kijy

#### 4.2.2. Indice de conservation

Le résultat de l'ANOVA sur la comparaison des moyennes de l'indice de conservation entre les espèces dans la station d'Ankatso révèle une différence significative ( $p$ -value < 0,05). Le bois le mieux conservé correspond à l'espèce Ambora (PM =  $95 \pm 2,24\%$ ). Cedrela est l'espèce la plus dégradée (PM =  $85,5 \pm 2,29\%$ ).

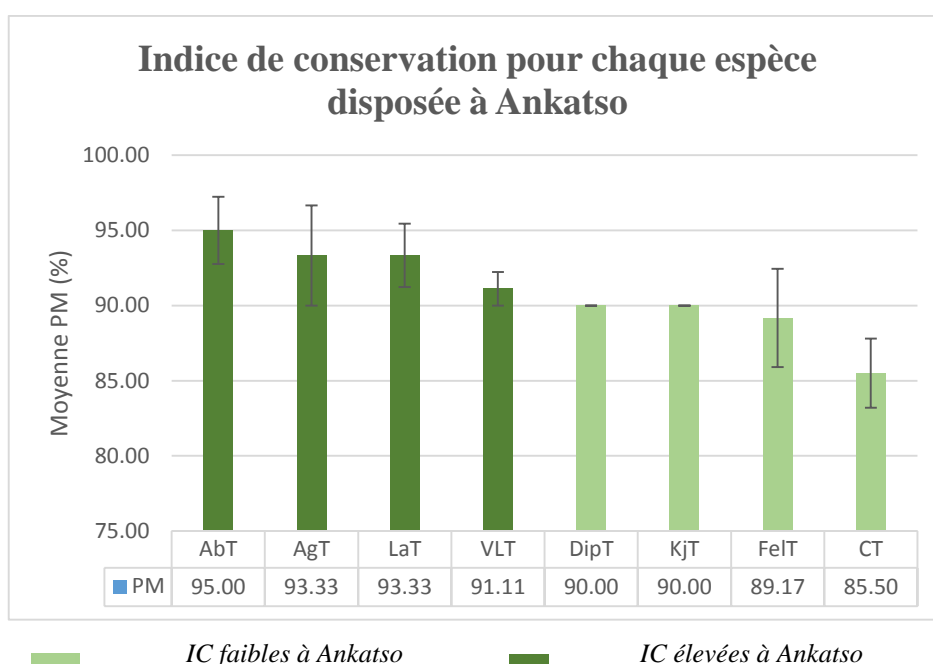


Figure 12 : Indice de conservation moyenne (IC) pour chaque espèce disposée à Ankatso

AbT : Ambora Tanà, LaT : Lalona Tanà AgT : Angavo Tanà, CT : Cedrela Tanà, VLT : Valanirana Tanà, DipT : Dipaty Tanà, FelT : Felamborona Tanà, KJT : Kijy Tanà

Ainsi selon la grille d'évaluation établie par EDLUND et al. (2006) relative à la norme EN 252 (1989), le bois des espèces Ambora, Lalona, Angavo et Valanirana est très durable. Le bois des quatre autres espèces Dipaty, Kijy, Felamborona et Cedrela est durable (Tableau 12).

Pour la station de Mandraka, il n'existe pas de différence significative entre les moyennes de l'indice de conservation des espèces car les éprouvettes ont toutes été conservées à 90%. La dégradation observée se limite à un changement de couleur sur l'ensemble des échantillons. Par conséquent, le bois de toutes les espèces disposées dans cette station est durable (Tableau 12).

Tableau 12 : Evaluation de la durabilité naturelle par l'indice de conservation selon EDLUND et al. (2006)

Site Essence	Ankatso		Mandraka	
	Durabilité selon l'indice de conservation	Classe de durabilité	Durabilité selon l'indice de conservation	Classe de durabilité
Cedrela	Durable	2	Durable	2
Lalona	Très durable	1	Durable	2
Dipaty	Durable	2	Durable	2
Felamborona	Durable	2	Durable	2
Valanirana	Très durable	1	Durable	2
Kijy	Durable	2	Durable	2
Ambora	Très durable	1	Durable	2
Angavo	Très durable	1	Durable	2

Ainsi le tableau 13 résume la durabilité des espèces selon l'indice de conservation pour chaque station par ordre croissant.

Tableau 13 : Ordre de durabilité croissante du bois des espèces dans chaque station selon la classe de durabilité relative à l'indice de conservation

Durabilité croissante des espèces à Ankatso selon l'indice de conservation	Durabilité croissante des espèces à Mandraka selon l'indice de conservation
Cedrela, Felamborona, Kijy, Dipaty	Même classe de durabilité pour les 8 espèces
Valanirana, Lalona, Angavo, Ambora	

### 4.3. Influence des propriétés physiques sur la durabilité naturelle

Les valeurs des propriétés physiques infradensité, densité, retraits, coefficient de rétractabilité et PSF ont été déterminées (Tableau 14).



Tableau 14 : Valeurs des propriétés physiques mesurées

Espèce	Infradensité	Densité	PSF (%)	Retrait radial (%)	Retrait tangentiel (%)	Retrait volumique (%)	Coefficient de rétractabilité
<b>Cedrela</b>	0,29	0,36	28,10	4,17	5,98	10,50	0,37
<b>Dipaty</b>	0,66	0,85	23,48	4,69	7,28	11,43	0,49
<b>Felamborona</b>	0,63	0,81	24,83	5,51	8,10	13,80	0,56
<b>Kijy</b>	0,60	0,77	26,13	6,36	8,31	14,23	0,54
<b>Ambora</b>	0,48	0,59	27,40	4,12	8,58	12,52	0,46
<b>Angavo</b>	0,50	0,72	38,60	5,98	11,33	16,89	0,44
<b>Lalona</b>	0,63	0,83	28,59	5,63	9,16	14,55	0,51
<b>Valanirana</b>	0,67	0,89	25,08	5,56	10,13	15,39	0,61

#### 4.3.1. *Corrélation entre les paramètres de propriétés physiques et la perte de masse*

Pour la station d'Ankatso, la corrélation est significative entre les retraits (tangentiel, volumique) et la perte de masse. La corrélation entre le retrait tangentiel et la perte de masse est très forte et négative ( $R = -0,929$ ). Celle entre le retrait volumique et la perte de masse est forte et également négative ( $R = -0,857$ ). Ainsi, la valeur de la perte de masse augmente proportionnellement avec la régression de la valeur des retraits tangentiel et volumique. Par contre pour la station de Mandraka, la corrélation entre la perte de masse et les valeurs des propriétés physiques n'est pas significative (Tableau 15).

Tableau 15 : Corrélation entre les propriétés physiques et la perte de masse

Variables	Perte de masse à Ankatso	Perte de masse à Mandraka
<b>Perte de masse à Ankatso</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Infradensité</b>	-0,333	0,048
<b>Densité</b>	-0,429	0,143
<b>PSF</b>	-0,333	0,167
<b>Retrait radial</b>	-0,452	-0,429
<b>Retrait tangentiel</b>	<b>-0,929</b>	0,095
<b>Retrait volumique</b>	<b>-0,857</b>	-0,071
<b>Coefficient de rétractabilité</b>	-0,429	-0,095

#### 4.3.2. *Corrélation entre les paramètres de propriétés physiques et l'indice de conservation*

Le test de corrélation des paramètres densité, infradensité, retraits, PSF avec l'indice de conservation pour la station de Mandraka montre une absence de corrélation car les valeurs des IC pour cette station sont identiques ( $IC = 90\%$ ).

Quant à la station d'Ankatso, le test de Spearman montre que seul le retrait tangentiel présente une corrélation significative avec l'indice de conservation. La corrélation est positive et forte ( $R = 0,756$ ) (Tableau 16). Par conséquent, le retrait tangentiel augmente ou diminue proportionnellement avec l'indice de conservation. En d'autres termes, le bois des espèces est d'autant plus durable que le retrait tangentiel est élevé.

Tableau 16 : Corrélation entre les propriétés physiques et l'indice de conservation

<b>Variables</b>	<b>Indice de Conservation à Ankatso</b>
<b>Classe de durabilité</b>	<b>1</b>
<b>Infradensité</b>	-0,024
<b>Densité</b>	0,073
<b>PSF</b>	0,415
<b>Retrait radial</b>	0,049
<b>Retrait tangentiel</b>	<b>0,756</b>
<b>Retrait volumique</b>	0,512
<b>Coefficient de rétractabilité</b>	0,024

DISCUSSIONS

et

RECOMMENDATIONS

## Partie 5. DISCUSSIONS et RECOMMANDATIONS

### 5.1. Discussions

#### 5.1.1. Discussions sur la méthodologie

##### 5.1.1.1. Méthode choisie pour l'évaluation de la durabilité naturelle

La méthode d'évaluation de la durabilité naturelle choisie dans cette étude est l'essai de champ. Il s'agit de la méthode la mieux adaptée pour Madagascar car le laboratoire de l'Unité de Formation Bois au niveau de l'ESSA-Forêts ne dispose pas encore des équipements nécessaires pour conduire un test au sein d'un environnement contrôlé.

Le test en laboratoire présente les avantages d'être moins imposant en termes de temps, soit 16 semaines (EN 113, 1996) et permet d'évaluer l'effet d'agents spécifiques sur le bois. Toutefois l'essai de champ est généralement préféré pour évaluer la durabilité parce que le bois est soumis à une plus large diversité d'agents biologiques de dégradation qui agit en synergie avec les facteurs climatiques (SEN-SARMA et CHATTERJEE, 1968). De plus, les environnements tropicaux comme Madagascar offrent les meilleures conditions pour obtenir des données fiables sur la résistance naturelle du bois contre les agents de dégradation (BULTMAN et SOUTHWELL, 1976). Les résultats des tests de laboratoire sont difficilement transférables à des situations réelles alors que les essais de champ assurent des conditions plus réalistes (MEYER, 2013). Toutefois, il est plus intéressant d'appliquer l'essai de champ sur plusieurs sites de test afin de connaître l'aptitude de chaque espèce à résister face à des conditions stationnelles différentes.

Par ailleurs, la norme EN 252 (1989) a été choisie pour cette recherche du fait qu'il s'agit de la norme la plus représentée dans la littérature dans la caractérisation de la durabilité du bois selon un essai de champ (BRISCHKE et al., 2013 ; ALI et al., 2011 ; BRISCHKE et al., 2008 ; ANTWI-BOASIAKO et al., 2010 ; JEBRANE et al., 2014). Dans sa conception, cette norme est destinée à déterminer l'efficacité protectrice relative d'un produit de préservation du bois en contact avec le sol mais elle peut également être utilisée pour évaluer la durabilité naturelle des essences sans traitement.

La collecte des bois nécessite l'abattage des arbres, ce qui constitue une méthode destructive vis-à-vis des ressources forestières. Selon MATTOS et al., (2014) et KOKUTSE et al., (2009), ces dernières années, des techniques alternatives comme la spectroscopie proche infrarouge (SPIR) peuvent être développées pour évaluer de manière non destructive la dégradation du matériau bois par les organismes xylophages. Puisque le laboratoire de l'UFR Sciences du bois dispose depuis quelques mois d'un outil SPIR, il serait intéressant de développer et calibrer cet outil pour pouvoir évaluer la durabilité en service des bois malgaches. Mais cela nécessite de poursuivre les essais sur quelques années, permettant la discrimination franche des différentes essences.

En outre, la différence du nombre d'éprouvettes d'essai utilisées dans chaque station pour chaque espèce a été due à la constatation de parties abîmées du bois de certaines espèces au cours de l'usinage. Ce qui a conduit à les éliminer afin de ne pas biaiser l'évaluation de la durabilité naturelle.

#### 5.1.1.2. Critères d'évaluation de la durabilité naturelle

La considération de l'aspect à la fois qualitative et quantitative pour évaluer la durabilité naturelle est importante. En effet, la perte de masse permet d'apprécier les dégâts à la fois visibles et non visibles. Elle permet aussi de vérifier si les dégâts visibles sont significatifs ou non (RAZAFINDRAKOTO, 2013) tandis que l'importance des dégâts permet de noter les dégradations visibles. La méthode qualitative est pourtant qualifiée de subjective du fait qu'elle dépend de la capacité de perception de l'observateur (MATTOS et al., 2014). Ces deux paramètres sont alors complémentaires.

Une identification des types de dégradations et les agents d'altération observés sur les éprouvettes est aussi indispensable afin d'avoir un aperçu sur les organismes qui se sont installés sur les matériaux après les six mois d'exposition. Le type d'altération rencontrée se limite à la présence de champignons sur les éprouvettes d'essai bien qu'au niveau des sites d'expérimentation, il existe également des insectes xylophages et xylophiles. Avec l'appui des responsables au niveau du CNRE, quelques champignons qui sont responsables de pourriture fibreuse ont été identifiés. Les autres manifestations constatées nécessitent une analyse d'ADN afin d'identifier le type de champignons car ces derniers ne se trouvent qu'à la phase d'installation. Par ailleurs, les bactéries du sol n'ont pas pu être considérées dans le cadre de cette étude faute de temps et de moyens.

Dans cette étude, la perte de masse en pourcentage a été estimée et non calculée, et donc avec une incertitude associée à cette estimation. En effet, pour calculer la perte de masse, la formule à utiliser fait intervenir la masse anhydre avant et après l'essai. Pourtant, afin de ne pas détruire les éprouvettes, elles n'ont pas été stabilisées dans une étuve pour l'obtention des masses anhydres car la présente étude constitue une première évaluation de la dégradation des éprouvettes. En d'autres termes, l'expérimentation ne se limite pas aux six mois de ce travail de Master mais va se poursuivre sur plusieurs années. Ainsi, il a fallu faire intervenir la condition saturée pour évaluer la perte de masse. Mais des marges d'erreurs se posent sur le fait que les deux stations d'essai ne présentent pas les mêmes conditions climatiques (température, humidité) c'est-à-dire que les taux d'humidité des éprouvettes ne sont pas forcément les mêmes pour les deux sites d'expérimentation. De plus les éprouvettes en cours de test présentent une moitié longitudinale sous terre et une autre moitié à l'air libre. En effet, le niveau d'humidité est maintenu pour la partie enterrée et la portion exposée subit constamment une dessiccation (BULTMAN et SOUTHWELL, 1976). Par conséquent, l'évaluation de la perte de masse conviendrait plus à une comparaison inter-espèce dans chaque station.

#### 5.1.1.3. Choix des paramètres technologiques pour l'étude de corrélation

Les propriétés physiques choisies pour l'étude de corrélation avec la durabilité naturelle ont été la densité, les retraits et le PSF. Ce sont des propriétés du bois qui sont directement liées au taux d'humidité

du bois. L'humidité est le facteur qui intervient à priori dans la dégradation de ce matériau notamment par les champignons. D'autres propriétés importantes présentant un effet direct sur la durabilité du bois principalement la teneur en lignine (MBURU, 2013) et la nature des extractibles (JEHRANE et al., 2014) n'ont pas été étudiées faute de moyens financiers et d'équipements. MBURU (2013) affirme que la stabilité dimensionnelle et une teneur élevée en extractibles et en lignine expliquent en partie la grande durabilité de l'espèce *Prunus Africana* pour son utilisation en extérieure. La présence d'une quantité importante de phytostéroïdes à savoir l'acide oléanolique et l'acide ursolique est considérée comme étant l'origine de la durabilité naturelle du bois de cette espèce (MBURU et al., 2007).

### **5.1.2. Discussions sur les résultats**

#### **5.1.2.1. Effet de la station sur la durabilité naturelle**

Les résultats sur la perte de masse ont montré que le site d'Ankatso est plus agressif en matière de dégradation du bois par rapport au site de Mandraka. Par contre, les résultats sur l'indice de conservation montrent que la différence n'est pas significative entre les deux sites. Néanmoins, pour les trois espèces Ambora, Angavo et Lalona, leur durabilité est influencée par le site avec une sensibilité plus importante aux conditions du milieu à Mandraka. Ce qui rejoint l'affirmation d'IRBE et al. (2012) selon laquelle les risques de dégradation du bois sont plus importants sous un climat humide que sous un climat sec. Ceci du fait que les facteurs climatiques et leur saisonnalité contrôlent largement les activités de la communauté de décomposeurs à savoir les champignons et la faune du sol en accélérant le processus de dégradation (SUNDARARAJ et al., 2015). Cependant, des études ont montré qu'il n'existe aucun lien direct entre les caractéristiques climatiques (précipitation et température) et la dégradation du bois (BRISCHKE et al., 2006). Toutefois, elles présentent un effet indirect sur la croissance des organismes xylophages. La constance des influences environnementales en particulier l'humidité est un facteur clé. Ainsi, la durée de la présence de pluie offre de plus grand risque que la quantité de pluie (BRISCHKE et al., 2006).

Par ailleurs, le taux de dégradation du bois en contact avec le sol dépend aussi du type de sol ainsi que de la diversité des organismes qui y vivent (BRISCHKE et al., 2006). Les conditions optimales pour une dégradation sont une température et une humidité élevées et un sol bien aéré mais également la composition chimique et la présence d'éléments nutritifs car elles déterminent le développement des champignons (RABERG et al., 2013 ; BRISCHKE et al., 2013). A cause de l'abondance du sable, le sol à Ankatso a une tendance à se dessécher plus rapidement. Par contre le sol à Mandraka a une faculté à retenir l'eau par sa texture limono-argileuse. Les moyennes de taux d'humidité et la température du sol à Ankatso correspondant aux six mois d'expérimentation sont successivement de 20,35°C et 22,6% contre 20,78°C et 34,35% pour la station de Mandraka. Un sol à humidité élevée conduit à une augmentation de la teneur en humidité du bois et le sol en question constitue un risque élevé de dégradation (BRISCHKE et al., 2013).

La présence de pluie ainsi qu'une température favorable durant cette étude a permis à priori le développement des champignons. Ceci ne présume en rien la résistance du bois de ces espèces face aux insectes et aux termites. En poursuivant l'expérimentation après les six mois, il est possible de continuer à évaluer l'évolution des dégâts. Puisque les champignons sont en phase d'installation, seules quelques espèces ont été identifiées dans la station de Mandraka à savoir *Arrhenia sp*, *Amylostereum* et le genre *Hypoxylon*. Ils sont responsables de pourriture blanche. L'indentification s'est limitée au niveau genre car la systématique des polypores est assez difficile et nécessite généralement des études microscopiques détaillées. Les autres observations montraient le développement de mycélium et un changement de la couleur du bois causé par des champignons lignicoles.

#### *5.1.2.2. Effet du facteur espèce sur la durabilité naturelle*

Les résultats ont montré que l'ordre de durabilité croissante pour chaque espèce n'est pas le même pour les deux stations. La raison possible pour expliquer ce résultat est la présence d'agents de dégradation spécifique pour chaque espèce. De plus, principalement pour les espèces Ambora, Angavo et Lalona, l'effet de la station est observé. La résistance à la dégradation du bois dépend à la fois des facteurs génétiques et environnementaux (JEBRANE et al., 2014). Selon SCHEFFER et MORRELL (1998), la durabilité naturelle du bois peut largement varier selon les agents d'altération biologiques. Toutefois, il a été constaté que l'espèce *Cedrela odorata* est toujours plus sensible à la dégradation comparé aux autres espèces quelle que soit la station considérée.

Selon BRISCHKE et al (2006), du moment que les facteurs endogènes et exogènes sont en équilibres, la durée de vie en service du bois est optimale. La variation peu marquée de la durabilité des huit espèces dans les deux stations peut être attribuée à la durée de l'exposition (6 mois). Il est ainsi préconisé de poursuivre l'étude.

La conformité de la durabilité naturelle du bois des espèces étudiées avec la bibliographie dépend du site considéré. Il est à noter que les conditions de conduite de l'expérimentation dans la littérature n'ont pas été détaillées. De plus, les résultats des auteurs concernant la durabilité de ces espèces sont différents (Tableau 17).

Tableau 17 : Durabilité du bois des espèces selon la recherche et la bibliographie

Nom vernaculaire	Durabilité selon cette étude pour la station d'Ankatso	Durabilité selon cette étude pour la station de Mandraka	Durabilité selon la bibliographie
Ambora	Très durable	Durable	-Tambourissa spp. : Très durable (RAKOTOVAO et al., 2012) -Moyennement durable (LEMMENS et al., 2008)
Lalona	Très durable	Durable	Très durable (RAKOTOVAO et al., 2012)
Angavo	Très durable	Durable	Absent
Valanirana	Très durable	Durable	Absent
Dipaty	Durable	Durable	Absent
Kijy	Durable	Durable	<i>Garcinia verrucosa</i> : durable (RAKOTOVAO et al., 2012)
Felamborona	Durable	Durable	Moyennement à peu durable (RAKOTOVAO et al., 2012) Durable (LEMMENS et al., 2008)
Cedrela	Durable	Durable	Moyennement durable (VAN DER HOUT, 2015) Moyennement durable (BLASER et al., 1993)

Le bois des espèces très durables résultant de cette étude présentent la même qualité de durabilité que *Cedrelopsis grevei* (Katrafay), *Intsia bijuga* (Hintsy), *Breonadia microcephala* (Sohihy) ou encore *Faucherea spp* (Nanto mena). Les espèces durables appartiennent au groupe des espèces *Erythroxylum spp.* (Menahy) ou *Androstachys johnsonii Prain* (Merana) (RAKOTOVAO et al., 2012)..

En traduisant ces échelles de durabilité en durée de vie des ouvrages, BEAUCHENE (2006) a défini la durée de vie des espèces très durables à plus de 10 ans et pour les espèces durables de 5 à 10 ans pour des utilisations en milieu tropical.

### 5.1.2.3. *Corrélation entre les propriétés physiques et la durabilité naturelle*

Pour la station d'Ankatso, la corrélation est significative entre les retraits (tangentiels, volumiques) et la perte de masse avec des coefficients négatifs. Par contre pour la station de Mandraka, la corrélation entre la perte de masse et les valeurs des propriétés physiques n'est pas significative. Pour la station d'Ankatso, la corrélation est significative et positive entre l'indice de conservation et le retrait tangentiel.



A ce jour, il n'existe aucune étude qui s'est focalisée sur la corrélation entre les retraits et la durabilité du bois. Néanmoins, la stabilité dimensionnelle du bois est très importante pour son utilisation en extérieure (ALI *et al.*, 2011). La charge que subit l'intérieur du bois au gonflement et au retrait combinés à l'anisotropie du bois conduit à une déformation ainsi qu'une fissure. Cette dernière constitue une porte d'entrée pour l'humidité et les spores des champignons (BRISCHKE *et al.*, 2006, ANTWI-BOASIAKO *et ALLOTEY*, 2010). Ainsi, les bois qui présentent une anisotropie importante sont susceptibles de se dégrader plus facilement. Cependant, il est à constater que le retrait ne constitue pas à lui seul le facteur de formation de fissure sur le bois car la photodégradation due à la lumière solaire joue également un rôle majeur.

Concernant le PSF, SCHMIDT (2007) affirme qu'il existe une très faible voire même une absence d'activité fongique en dessous du point de saturation des fibres. C'est à ce point que la quantité d'eau présente est juste suffisante pour saturer les parois cellulaires (SCHEFFER, 1973 in BULTMAN *et SOUTHWELL*, 1976). Pour une humidité en dessous du PSF, les enzymes responsables de la décomposition de la paroi cellulaire du bois libérées par les champignons ne sont pas transportées et restent ainsi inactives (BRISCHKE *et al.*, 2006). Selon CHAOUCH (2011), un PSF plus bas confère une meilleure résistance face aux agents de pourriture. Il est possible d'en déduire, que les bois à faible PSF sont plus à l'abri des attaques fongiques. Ce qui n'est pas conforme aux résultats de cette étude car aucune corrélation n'a été observée ni entre le PSF et la perte masse, ni entre le PSF et l'indice de conservation.

En ce qui concerne la relation entre la durabilité et la densité du bois, différentes affirmations existent à ce propos dans la littérature. Plusieurs auteurs ont trouvé que les bois à forte densité sont résistants face à la dégradation (BULTMAN *et SOUTHWELL*, 1976) alors que certains auteurs ont trouvé que les bois denses ne sont pas nécessairement résistants aux attaques des organismes d'altération (BRISCHKE *et al.*, 2006). BULTMAN *et SOUTHWELL* (1976) affirment qu'il existe pourtant une relation inverse entre la capacité d'absorption d'eau du bois et sa densité. Ainsi, les bois denses pourraient avoir une capacité d'absorption d'eau plus lente, ce qui constitue un frein au développement des agents d'altération notamment les champignons. Les résultats de cette étude ne sont pas conformes à ces travaux d'autres chercheurs puisque qu'aucune corrélation n'a été trouvée entre le paramètre densité et la durabilité en service. Ceci peut s'expliquer par le fait que plusieurs espèces présentent la même durabilité. Pour la station de Mandraka, il n'existe que deux classes de durabilité, la classe 4 (peu durable) et la classe 3 (moyennement durable) selon la perte de masse. De même pour l'indice de conservation pour la station d'Ankatso, il n'existe que deux classes de durabilité qui sont la classe 1 (très durable) et la classe 2 (durable).

5.1.2.4. Utilisation des espèces et données complémentaires

Il est remarqué que la valorisation des bois présents sur le marché local est généralement orientée vers des utilisations en intérieur. Cependant, nombreux sont les espèces qui pourraient convenir pour un usage extérieur (RAJONSHON et al., 2014).

En considérant les résultats issus de cette recherche, les huit espèces conviennent toutes pour une utilisation sous une classe d'emploi 4 car leur indice de conservation se trouve au-dessus de la limite requise qui est de 50% (RAKOTOSOLONIAINA, 2013). Cependant, l'espèce *Cedrela odorata* a présenté les dégâts les plus importants en dépit de la durée de l'expérimentation. Par conséquent, il serait préférable de l'utiliser en intérieur ou d'avoir recours à l'usage de produit de préservation adapté. Cette espèce est pourtant la plus utilisée dans la construction des ouvrages à Mandraka.

En se référant aux résultats de cette recherche, toutes les espèces étudiées peuvent être utilisées en extérieur, toutefois il serait judicieux de poursuivre l'expérimentation et de procéder à un reclassement selon l'évolution des résultats.

Outre la qualité technologique des espèces ligneuses, il convient de toujours considérer leur disponibilité en forêt c'est-à-dire les volumes sur pied inventoriés et mobilisables (FOURNIER et al., 2003) avant d'établir un plan de valorisation adaptée. La disponibilité et le comportement sylvicole des essences restent à déterminer avant leur vulgarisation sur le marché.

*Cedrela odorata* est une espèce pionnière à croissance rapide et qui se régénère facilement. Cette espèce s'adapte bien dans la région orientale et dans le Sambirano (BLASER et al., 1993). Pourtant le genre *Cedrela* figure parmi les genres botaniques utilisés en foresterie qui présentent à ce jour des risques d'invasions majeurs (TASSIN et al., 2009).

Pour le cas de l'espèce *Agauria sp.*, il s'agit d'une espèce pionnière de forêt secondaire à croissance rapide (ARITSARA, 2015). Le genre *Agauria* est très représenté à Madagascar et se rencontre dans les forêts et prairies des hauts plateaux (LHULLIER, 2007).

*Nuxia capitata* est une espèce nomade qui peut être utilisée en reforestation. Elle est largement distribuée au niveau de l'ensemble des forêts sempervirentes humides et subhumides de 800 à 1800 m d'altitude (CARRIERE et al., 2007). Cette espèce présente la contrainte de présenter une tige cannelée qui limite le rendement de valorisation (ARITSARA, 2015).

*Neotina isoneura* (Radlk.) Capuron est une espèce nomade. Elle se rencontre dans la forêt sempervirente, généralement à des altitudes moyennes. Cette espèce est considérée comme menacée à cause de la réduction des surfaces forestières à Madagascar (LEMMENS et al., 2008). Elle présente également la contrainte de se fendre facilement à l'abattage et au séchage (ARITSARA, 2015).

La forêt dense humide de moyenne altitude est aussi appelée forêt série à *Tambourissa* et à *Weinmannia* (HUMBERT et COURS DARNE, 1965). *Tambourissa trichophylla* Baker et *Weinmannia rutenbergii* sont déjà des espèces connues sur le marché (RAJONSHON, 2014 ; ARITSARA, 2015).

Pour le genre *Garcinia*, l'espèce *Garcinia verrucosa* est la plus connue. Elle se retrouve dans les forêts ombrophiles du domaine oriental d'Antsiranana à Taolagnaro (BLASER et al., 1993).

L'espèce *Bosqueia danguyana* Leandri est localisée dans la partie Est de l'île, dans la forêt d'Analamazaotra.

### 5.1.3. Vérification des hypothèses de recherche

#### 5.1.3.1. Cas de l'hypothèse 1

L'hypothèse 1 affirme que « **Les conditions stationnelles à Mandraka favorisent une dégradation plus sévère du bois par rapport à celles d'Ankatso (Antananarivo)** ». Les résultats de l'étude ont montré qu'il existe une différence significative de la perte de masse au niveau échantillon entre les deux stations avec une perte de masse moyenne plus élevée pour les échantillons à Ankatso. La différence est également significative au niveau espèce c'est-à-dire en considérant les mêmes espèces dans les deux stations.

Pour l'indice de conservation, il n'existe pas de différence significative entre les deux stations au niveau échantillon. Quant au niveau espèce, le bois des espèces *Ambora*, *Angavo* et *Lalona* est moins conservé à Mandraka contrairement à l'espèce *Cedrela* qui est plus dégradée dans la station d'Ankatso. Pour les espèces *Valanirana*, *Dipaty*, *Felamborona* et *Kijy*, la différence n'est pas significative.

A l'issue de ces résultats, il convient de conclure que l'hypothèse 1 est partiellement vérifiée. Elle est validée pour les espèces *Ambora*, *Angavo* et *Lalona*.

#### 5.1.3.2. Cas de l'hypothèse 2

D'après l'hypothèse 2, « **La durabilité naturelle du bois d'une espèce par rapport à une autre est maintenue dans les deux stations** ». Les résultats de l'étude ont montré que l'ordre de durabilité croissante des espèces n'est pas identique pour les deux stations. Toutefois, il a été constaté que par rapport aux autres espèces étudiées, l'espèce *Cedrela odorata* reste la plus dégradée dans les deux stations. Par conséquent, l'hypothèse 2 est partiellement vérifiée.

#### 5.1.3.3. Cas de l'hypothèse 3

Selon l'hypothèse 3, « **La durabilité naturelle du bois dépend de ses propriétés physiques** ». Les sous hypothèses affirment successivement que :

- La durabilité naturelle est d'autant plus élevée que la densité du bois est grande ;
- Le bois des espèces à faible retrait est durable ;
- Une valeur de PSF élevée influe négativement la durabilité ;
- La durabilité du bois est d'autant plus faible qu'il présente un coefficient de rétractabilité élevé.

Les résultats ont montré que la corrélation est négative entre la perte de masse et les retraits radial, volumique et positive entre le retrait tangentiel et l'indice de conservation. Ce qui est contradictoire avec l'hypothèse 3. Puisqu'aucune corrélation n'a été observée pour les autres paramètres de propriétés physiques, l'hypothèse 3 est alors rejetée.

## **5.2. Recommandations**

### **5.2.1. *Recommandations sur la méthodologie de recherche***

Concernant la préparation des échantillons, il est recommandé de produire des échantillons supplémentaires afin de s'adapter aux imprévus tels que la nécessité d'un séchage de quelques échantillons pour représenter la masse anhydre.

Pour la suite de cette recherche, l'évaluation des dégâts devrait se faire tous les six mois en prenant soin de considérer et de noter les organismes xylophages et xylophiles observés jusqu'à la rupture des piquets afin d'obtenir l'évolution et la vitesse de dégradation du bois de ces espèces. Fortement mentionnées dans la littérature (JEBRANE et al., 2014 ; IRBE et al., 2012 ; HUMAR et al., 2008), l'identification et la caractérisation des extractibles présents dans le bois des espèces étudiées devraient être mises en œuvre. Une expérimentation en laboratoire est également à entreprendre pour procéder à une étude comparative avec le test de champ utilisé dans cette étude.

A ces faits, il faudrait mobiliser des fonds importants pour réaliser ces études. Par conséquent, il est primordial d'établir des partenariats extérieurs.

### **5.2.2. *Recommandations pratiques issues de la recherche***

Alors que la valorisation du bois constitue d'importantes ressources économiques pour un pays comme Madagascar, les bases de données sur leurs propriétés sont à ce jour insuffisantes. Ainsi, un grand nombre de recherches restent à faire non seulement au niveau de la station forestière de Mandraka mais aussi au niveau de toutes les forêts dans la grande île. Une vulgarisation des informations à l'issue de ces études s'impose. L'objectif global est de « **Développer les connaissances sur les bois malgaches en vue d'une meilleure valorisation** ». Il en résulte deux objectifs spécifiques :

#### **5.2.2.1. *Dynamiser les recherches sur le bois à Madagascar***

Les recherches peuvent compléter les informations manquantes sur les espèces déjà étudiées auparavant par d'autres auteurs notamment la durabilité naturelle. Il reste environ 4 200 espèces à caractériser afin de définir leurs potentialités pour une utilisation locale ou pour une ouverture sur le marché extérieur. Pour compléter les lacunes sur les connaissances de la durabilité naturelle des bois malgaches, il faut mener des recherches en priorisant ce thème d'étude.

Les centres de recherche et de formation spécialisés en science du bois sont encore très peu développés à Madagascar. De plus, pour des études approfondies, il est nécessaire de disposer d'infrastructure et

d'équipements adaptés. Il faudrait alors procéder à des investissements. La promotion d'échange de compétence avec d'autres chercheurs expérimentés est aussi primordiale.

Les analyses ne devraient pas se limiter uniquement à l'étude du bois mais devrait être pluridisciplinaires par la caractérisation de l'écologie, de la sylviculture, de l'abondance, de la disponibilité et des valeurs culturelles.

*5.2.2.2. Capitaliser les connaissances acquises*

Pour contribuer à l'essor de la filière bois à Madagascar, toutes les données recueillies devront être valorisées. Pour que les connaissances puissent être utilisées par les acteurs concernés, elles devraient être partagées. Il faudrait faciliter l'accès à ces informations et promouvoir le renforcement de capacité. Des outils de gestion des ressources doivent obligatoirement être mis en place afin de garantir une utilisation durable. Particulièrement, l'incitation à l'utilisation des bois durables des espèces sous-valorisées permettraient de réduire l'utilisation des produits de préservation et d'adopter une approche plus efficace dans la gestion de l'exploitation forestière.

Tableau 18 : Cadre logique

Echéance : CT (Court Terme) &lt; 2 ans ; MT (Moyen terme) : 2 à 5 ans ; LT (Long terme) &gt; 5 ans

Objectif global : <b>Développer les connaissances sur les bois malgaches en vue d'une meilleure valorisation</b>					
Objectif spécifique 1 : <i>Dynamiser les recherches sur le bois à Madagascar en priorisant l'étude de la durabilité naturelle</i>					
Résultat attendu : Les bases de données sur les bois malgaches sont enrichies					
Activités	Sous-activités	Responsables	Indicateurs	Sources de vérification	Echéance
Disposer d'une base de données dynamique et complète sur le bois	Entamer des études en ciblant les espèces sous-valorisées	Chercheurs	Nombre des espèces secondaires étudiés	Fiches techniques des espèces	CT
	Mettre en place des dispositifs locaux de test de durabilité naturelle	Chercheurs	Nombre d'essai réalisé	Rapport d'expérimentation	MT
	Evaluer la durabilité naturelle jusqu'à rupture des piquets de test	Chercheurs	Degré de dégradation des piquets	Rapport d'évaluation	MT
	Définir les facteurs intrinsèques au bois responsables de sa durabilité	Chercheurs	Valeurs des facteurs intrinsèques déterminés	Publications scientifiques	MT
	Attribuer au bois de chaque espèce une classe d'emploi selon sa durabilité	Chercheurs	Nombre d'espèces catégorisé selon les classes d'emploi	Fiches techniques	MT

Définir les facteurs de risques de dégradation du bois à Madagascar	Inventorier les agents de dégradation du bois à Madagascar selon les localités	Chercheurs	Nombre d'agents de dégradation du bois déterminé	Fiche d'inventaire Publications scientifiques	MT
	Collecter et exploiter les données climatiques et édaphiques ponctuelles pour chaque site d'essai	Chercheurs	Données climatiques et édaphiques collectées	Fiche de suivi	MT
Soutenir la recherche scientifique relative aux ressources en bois	Promouvoir et développer des réseaux ou groupes de travail	Centres nationaux et internationaux de recherche, ONGs, communautés locales, Ministères, chercheurs, étudiants	Nombre de plateforme mis en place	Contrat de partenariat	LT
	Renforcer la coopération entre les scientifiques nationaux et la communauté scientifique internationale à travers des partenariats formalisés	Centres nationaux et internationaux de recherche, ONGs, communautés locales, ministères, chercheurs, étudiants	Nombre de partenariats scientifiques	Contrat de partenariat	LT
	Multiplier les laboratoires spécialisés et les doter d'équipements adéquats		Nombre de laboratoires équipés	Bâtiments, fiches de stocks des équipements, rapport	MT

Recueillir des données complémentaires sur les espèces ligneuses	Etudier les potentiels disponibles concernant les espèces	Chercheurs, communautés locales	Abondance et distribution des espèces	Fiche d'inventaire	MT
	Approfondir les études sur la sylviculture et les aspects sociaux		Données sylvicoles et sociales		MT
<b>Objectif spécifique 2 : Capitaliser les connaissances acquises</b>					
<b>Résultat attendu : Toutes les connaissances sur les bois malgaches sont valorisées</b>					
Activités	Sous-activités	Responsables	Indicateurs	Sources de vérification	Echéance
Partager les connaissances	Mettre les bases de données scientifiques à disposition des acteurs concernés	Chercheurs, entrepreneurs, communautés locales	Quantité de données exploitée	Articles, publications, supports de communication visuelle, rapport	LT
	Vulgariser les bonnes pratiques et les connaissances acquises auprès des communautés locales	Chercheurs, entrepreneurs, communautés locales	Quantité de données exploitée	Articles, publications, supports de communication visuelle, rapport	LT
					LT
Mettre en place des systèmes de gestion durable des ressources en bois	Etablir des plans d'aménagement adaptés pour chaque localité	Chercheurs, administration forestière	Nombre de plan d'aménagement par localité	Schémas d'aménagement du territoire	MT
	Mettre en place un outil de suivi et d'évaluation	Chercheur, administration forestière	Nombre d'outils de suivi élaboré	Rapport de suivi et d'évaluation	LT



Valoriser les bois naturellement durables pour les ouvrages extérieurs	Informer les consommateurs et les exploitants sur la potentialité des espèces sous-valorisées en termes de durabilité naturelle	Chercheurs	Fréquence de réunion d'information	Procès-verbaux de réunion, liste de présence	CT
	Inciter l'utilisation des bois naturellement durables pour les ouvrages extérieurs	Chercheurs, exploitants	Fréquence de réunion de sensibilisation	Procès-verbaux de réunion, liste de présence	CT

# CONCLUSION

## Partie 6. CONCLUSION

Cette étude a permis de déterminer la durabilité naturelle des espèces étudiées à termes des six mois d'expérimentation en utilisant la méthode de champ. Les résultats ont ressorti que la perte de masse est plus élevée pour les échantillons à Ankatso par rapport à celle des échantillons disposés à Mandraka. La dégradation plus marquée du bois à Mandraka n'est constatée que pour 3 espèces en considérant l'indice de conservation. Ceci s'explique par les conditions climatiques à Mandraka qui favorisent le développement des agents d'altération du bois à cause de la présence d'une humidité élevée. Ainsi, pour ces espèces, l'effet du site est confirmé et l'hypothèse de recherche est partiellement vérifiée.

Il a été soulevé que l'ordre de durabilité croissante n'est pas identique pour le bois des espèces dans les deux stations. Néanmoins, l'espèce *Cedrela odorata* est toujours la plus sensible face à la dégradation par rapport aux autres espèces. Les facteurs génétiques et environnementaux interviennent à la fois sur la durabilité du bois (JEBRANE et al., 2014). La seconde hypothèse est partiellement vérifiée.

Cette étude a également démontré que les retraits n'influencent pas positivement la durabilité en service du bois et il n'existe pas de relation entre les autres propriétés physiques (densité, PSF) et la durabilité naturelle. La dernière hypothèse est alors rejetée.

La présente étude a surtout permis d'avoir un aperçu sur les conditions et les facteurs qui sont susceptibles d'influencer la durabilité naturelle du bois. Toutes les espèces considérées dans cette recherche sont adaptées pour une utilisation en extérieure bien qu'il soit préconisé l'usage de produit de préservation pour l'espèce *Cedrela odorata* ou d'envisager une utilisation en intérieure. Et pour mieux cerner la durabilité naturelle des bois tropicaux, il faut considérer des paramètres supplémentaires tels que les taux d'extractibles qui interviennent sur la résistance des bois contre les attaques des champignons, des insectes et des microorganismes (BRISCHKE et al., 2006). Selon IRBE et al. (2012), la teneur en lignine influe positivement la durabilité naturelle du bois. Ce sont ainsi de nouvelles pistes pour caractériser la résistance du bois de ces espèces face aux agents biologiques d'altération.

Et pour une valorisation adaptée des essences ligneuses à Madagascar, en plus des propriétés technologiques du bois, il convient de considérer d'autres paramètres comme la disponibilité, le prix, l'esthétique et la valeur culturelle.

## BIBLIOGRAPHIE

1. Ali, A.C., Júnior, E.U., Råberg, U. & Terziev, N. (2011) Comparative natural durability of five wood species from Mozambique, *International Biodeterioration & Biodegradation* 65 : 768-776.
2. Prewitt, L., Kang, Y., Madhavi, L., Kakumanu & Williams, M. (2014) Fungal and Bacterial community succession differs for three wood types during decay in a forest soil, *ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*, p. 10.
3. Antwi-Boasiako, C. & Allotey, A. (2010) The effect of stake dimension on the field performance of two hardwoods with different durability classes. *International Biodeterioration & Biodegradation* 64 : 267-273.
4. Aritsara, A. (2015) Prospection sylvicole et étude technologique de quelques essences autochtones en vue d'une restauration écologique, Cas de la station forestière de la Mandraka, Région Analamanga. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur en Sciences Agronomiques et Environnementales au grade Master de Recherche en Foresterie et Environnement, p.121.
5. Beauchêne, J. (2006) Les Agents de dégradation du matériau bois, CIRAD.
6. Bernicchia, A. (2005) Polyporaceae s.l., *Fungi Europaei*, Volume 10, p.808.
7. Blaser, Ü., Rajoelison, G., Tsiza, G., Rajemison, M., Rabevohitra, R., Randrianjafy, H., Razafindrianilana, N., Rakotovao G. & COMTET, S. (1993) Choix des essences pour la sylviculture à Madagascar Akon'ny Ala, *Bulletin du Département des Eaux Et Forêts De L'E.S.S.A Tome 1, Tome2*, p.175.
8. Bosquet L. (2006) Méthodologie de la recherche. Cours de statistique sur la corrélation. Université Lille 2.
9. Brischke, C. & Otto Rapp, A. (2008) Dose–response relationships between wood moisture content, wood temperature and fungal decay determined for 23 European field test sites, *Wood Sci Technol* 42 : 507–518.
10. Brischke, C. & Otto Rapp, A. (2008) Influence of wood moisture content and wood temperature on fungal decay in the field: observations in different micro-climates, *Wood Sci Technol* 42 : 663–677.
11. Brischke, C., Melcher., Behnen, C.J., Lenz, M.T., Brand, K. & Melcher, E. (2012) Durability of oak timber bridges Impact of inherent wood resistance and environmental conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation* 75 : 115-123.
12. Brischke, C., Bayerbach, R. & Otto Rapp, A. (2006) Decay-influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products, *Wood Material Science and Engineering* 1 : 91- 107.

13. Brischke, C., Meyer, L. & Bornemann, T. (2013) The potential of moisture content measurements for testing the durability of timber products. *Wood Science Technology* 47 : 869–886.
14. Brischke, C., Meyer, L. & Olberding, S. (2013) Durability of wood exposed in ground Comparative field trials with different soil substrates, *International Biodeterioration & Biodegradation* 86 : 108-114.
15. Bultman, J.D. & Southwell, C.R. (1976) Natural Resistance of Tropical American Woods to Terrestrial Wood-Destroying Organism, *Biotropica* 8 (2) : 71-95.
16. Cailliez, F. & Gueneau, P. (1972) Analyse en composantes principales des propriétés technologiques des bois Malgaches. *Annales des sciences forestières, INRA/EDP Sciences*, 29 (2) : 215-265.
17. Campredon, J. & Rol, R. (1931) Recherches sur les bois bakélisés, pp.84-107.
18. Carrière, S.M., Ratolojanahary, M. & Randimbison A. (2007) Mise en défense forestière et durabilité de l'exploitation des essences forestières : le cas de 5 espèces ligneuses In Serpantié G., Rasolofoharino, Carrière S. (Eds sc.), *Transitions agraires, dynamiques écologiques et conservation*. IRD-CITE Ed. Paris, Antananarivo : 181-192.
19. Chaouch, M. (2011) Effet de l'intensité du traitement sur la composition élémentaire et la durabilité du bois traité thermiquement : développement d'un marqueur de prédiction de la résistance aux champignons basidiomycètes. Thèse Pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université Henri Poincaré Spécialité : SCIENCES DU BOIS & DES FIBRES, p. 219.
20. Clair, B. (2001) Etudes des propriétés mécaniques et du retrait au séchage du bois à l'échelle de la paroi cellulaire : essai de compréhension du comportement macroscopique paradoxal du bois de tension à couche gélatineuse. Thèse pour l'obtention du grade de Docteur de l'ENGREF, p.185.
21. Clesse, B. (2008) De l'observation des champignons lignicoles à la nécessité de conserver des bois morts, *L'Érable* : 9-20.
22. Daya, A. & BOUDAIA, E. (2015) Variation Radiale d'Humidité et d'Infradensité dans un Disque de Bois Vert d'Eucalyptus Grandis et de Chêne Vert, 22<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, p.8.
23. Dinh, A.T. (2012) Comportement élastique linéaire et non-linéaire du bois en relation avec sa structure. *Sylviculture, foresterie, Agro Paris Tech*, 2011. Français p.163.
24. Edlund, M.L., Evans, F. & Henriksen, K. (2006) Testing durability of treated wood according to EN 252 Interpretation of data from Nordic test fields". Nordic Innovation Centre project number : 04022 : 2- 13.
25. El Alami, S. (2013) Contribution à la caractérisation physique et mécanique et a la valorisation par le séchage du bois de la foret marocaine. Cas des eucalyptus et de la loupe de thuya. Thèse de doctorat, p.148.
26. ESSA-Forêts. (2014) LIVRE BLANC DE L'ETUDIANT DE L'ESSA-Forêts. p.21.

27. FAO. (2010) Evaluation des ressources forestières mondiales : 89-112.
28. FCBA. (2012) Bois Massifs Structuraux, p.5.
29. FORTIN, Y. & POLIQUIN, J. (1974) Durabilité naturelle et préservation de cent bois tropicaux africains. IDRC, p.145.
30. Fraiture, A. (2008) Introduction à la mycologie domestique, Les champignons qui croissent dans les maisons. Revue du Cercle de Mycologie de Bruxelles 8 : 25-56.
31. Fougerousse, M. (1958) les altérations fongiques des bois frais en Afrique tropicale et plus particulièrement de l'Ilomba et du Limba. Revue des bois et des Tropiques 60 : 41-56.
32. Fougerousse, M. (1960) Durabilité naturelle du bois. Revue Bois et Forêts des Tropiques, n° 73, Septembre-Octobre 1960 : 43-56.
33. Fouquet, D. (2003) Agents de détérioration et préservation des bois en milieu tropical humide. Bois et Forêts des Tropiques, 277 (3) : 19-34.
34. Fournier, M., Amusan, N., Beauchêne, J. & Mouras, S. (2003) L'homme et la forêt, Qualité des bois de Guyane, Rev. For. Fr. - numéro spécial 55 : 340-351.
35. Gérard, J., Kouassi, A.E., Daigremont, C., Détienne, P., Fouquet, D. & Vernay, M. (1998) Synthèse sur les caractéristiques technologiques de référence des principaux bois commerciaux africains, série FORAFRI Document 11, p.189.
36. Gueneau, P. & Gueneau, D (1969) Propriétés physiques et mécaniques des bois malgaches. Division de Technologie du Centre de Madagascar, p.76.
37. Guillaumet, J.L. (1983) Forêts et fourrés de montagne à Madagascar. Candolle 38 : 481-502.
38. Guinard, D. (2004) Le bois de ses origines à nos jours, Rev. For. Fr. Numéro spécial 56 : 39-46.
39. Hagora, L., Antonin, V. & Baier, J. (2000) Les champignons, p.416.
40. Humar, M., Blaz, F., Zupanc, M., Pohleven, F. & Zoven, P. (2008), Influence of xylem growth ring width and wood density on durability of oak heartwood. International Biodeterioration & Biodegradation 62 : 368–371.
41. Humbert, H. & Cours Darne, G. (1965). Carte internationale du tapis végétal et des conditions écologiques. Institut Français du Pondichéry.
42. Irbe, I., Noldt, G., Grinfelds, U., Verovkins, A., Jansons, A. & Koch, G. (2012) Genetic variation of Norway spruce clones regarding their natural durability, physical and chemical properties, Advances in Bioscience and Biotechnology 3 : 1104-1112.
43. Jebrane, M., Pockrandt, M. & Terziev Nasko. (2014) Natural durability of selected larch and Scots pine heartwoods in laboratory and field tests. International Biodeterioration Biodegradation 91 : 88-96.
44. Kokutse, A., Brancheriau, L. & Chaix, G. (2009) Rapid prediction of shrinkage and fibre saturation point on teak (*Tectona grandis*) wood based on near-infrared spectroscopy. Annals of Applied Biology 153, p.403.
45. Kull, C.A., Ratsirarson, J. & Randriamboavonjy, G. (2005) Les Forêts de tapia des Hautes Terres Malgache, Tany Malagasy 24 : 22 – 58.

46. Larsson-Brelid, P., Brischke, C., Rapp, A.O., Hansson, M., Westin, M., Jermer, J. & Pilgård, A. (2011) Methods of field data evaluation - time versus reliability. The international research group on wood protection, p.18.
47. Lemmens, R.H.M.J., Louppe, D. & Oteng-Amoako A.A. (2008) Bois d'œuvre 2, p.197.
48. Lhuillier, A. (2007) Contribution à l'étude phytochimique de quatre plantes malgaches : *Agauria salicifolia* Hook.f, *Agauria polyphylla* Baker (ERICACEAE), *Tambourissa trichophylla* Baker (MONIMIACEAE) et *Embelia concinnabaker* (MYRSINACEAE). Thèse présentée pour obtenir le titre de docteur de L'institut National Polytechnique de Toulouse, p.214.
49. MAEP. (2003) Monographie de la région d'Antananarivo. Unité de politique de développement rural (UPDR), p.139.
50. Mattos, B.D., Cademartori, P. H.G., Lourençon, T.V., Gatto, D. A. & Magalhaes, L.E. (2014) Biodeterioration of wood from two fast-growing eucalypts exposed to field test, *International Biodeterioration & Biodegradation* 93 : 210-215.
51. Mburu, F., Dumarçay, S., Thévenon, M.F., Gerardin, P. (2007) On the reasons of *Prunus africana* natural durability. International Research Group on Wood Protection Annual Meeting, Wyoming, Etats-Unis 38, p.13.
52. 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. *DRVNA INDUSTRIJA* 64 (1) : 19-24.
53. MEF. (2009) Quatrième rapport national de la Convention sur la Diversité Biologique - Madagascar, p.120.
54. Meyer, L., Brischke, C. & Pilgård, A. (2012) Moisture performance based wood durability testing. The International Research Group on Wood Protection, p.26.
55. Meyer, L., Brischke, C., Melcher, E., Brandt, K., Lenz, M.T. & Soetbeer, A. (2013) Durability of English oak (*Quercus robur* L.), Comparison of decay progress and resistance under various laboratory and field conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation* 86 : 79-85.
56. Meyers, D., Ramamonjisoa, B., Sève, J., Rajafindramanga, M. & Burren, C. (2006) Etude sur la consommation et la production en produits forestiers ligneux à Madagascar, p.87.
57. Moya, R., Berrocal, Alexander., Rodriguez-Zuñiga, Ana., Vega-Baudrit, José & Noguera, S.C. (2014), Effect of Silver Nanoparticles on White-Rot Wood Decay and Some Physical Properties of Three Tropical Wood Species. *Wood and Fiber Science*, 46, No 4.
58. NF B 51-006. (1985) Détermination du retrait. p.6.
59. NF EN 113. (1996) Méthode d'essai pour déterminer l'efficacité protectrice vis-à-vis des champignons basidiomycètes lignivores, p.33.
60. NF EN 252. (1989) Essai de champ pour déterminer l'efficacité protectrice relative d'un produit de préservation du bois en contact avec le sol, p.15.
61. NF EN 335-1. (2007) Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois, Définition des classes d'emploi, partie 1 Généralités, p.9.

62. NF EN 335-2. (2007) Durabilité du bois et des produits dérivés du bois, Définition des classes d'emploi, partie 2 Application au bois massif, p.12.
63. NF EN 350-1. (1994) Durabilité naturelle du bois massif, p.18.
64. Pignolet, O.M. (2008) Optimisation de la durabilité de bois d'œuvre (classe d'emploi 4) à l'aide d'anhydrides alkényles succiniques d'origine végétale. Thèse en vue de l'obtention du Doctorat de l'Université de Toulouse, p.282.
65. Råberg, U., Terziev, N. & Daniel, G. (2013) Degradation of Scots pine and beech wood exposed in four testfields used for testing of wood preservatives, *International Biodeterioration & Biodegradation* 79 : 20-27.
66. Rafidimanantsoa, HP. (2013) Estimation de la biomasse aérienne des arbres en forêt : quelles données d'infradensité du bois utiliser ? Cas de la forêt naturelle de Mandraka. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies en sciences agronomiques, p.38.
67. Rajemison, A.H. (2013) Proposition d'essences de substitution aux bois précieux en épuisement par la connaissance des propriétés du matériau bois : Cas du Palissandre Madagascar - Application en ameublement. Thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'Université de Toulouse, p.210.
68. Rajoelison, L.G., Randriamboavonjy, J.C., Razafindramanga, Rabenilalana, F.M. & Rakoto Ratsimba H. (2007) Rapport final aménagement participatif d'un bassin versant de la Mandraka, p.67.
69. Rajonshon, H., Gérard J., Guibal, D. & Ramananantoandro, T. (2014) Meilleure connaissance des propriétés des bois malgaches pour une valorisation durable des essences autochtones. Journée scientifique du GDR 3544 Sciences du Bois Nancy Faculté des Sciences et Technologie, p.8.
70. Rakotosoloniaina, A.N., (2013) Caractérisation des propriétés technologiques des bambous malgaches en vue de leur valorisation, Cas de: *Dendrocalamus asper*, *Dendrocalamus giganteus*, *Bambusa vulgaris constrictinoda*, *Bambusa vulgaris striata*. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur en Sciences Agronomiques, Option Eaux et Forêts, p.103.
71. Rakotovao, G., Rabevohitra A.R., Collas De Chatelperron, P., Guibal, D. & GERARD J. (2012) Atlas des bois de Madagascar, p.413.
72. Rakotovololonalimanana, H. (2013) Déterminisme génétique et environnemental des propriétés du bois de *Liquidambar styraciflua* L. de la Mandraka : adaptation aux reboisements malgaches et apports à la production ligneuse. Thèse en co-tutelle pour obtenir le grade de docteur de l'Université Montpellier 2 et de l'Université d'Antananarivo, p.206.
73. Randrianoely, M.O. (2015) Les agents biologiques d'attaque du bois à Mandraka. Mémoire en vue de l'obtention du Diplôme de Licence en Sciences Agronomiques et Environnementales, option Foresterie - Environnement, p.70.



74. Razafindrakoto, T. (2013) Durabilité en service de quatre espèces de bambous malgaches : essais d'amélioration par l'emploi de quatre moyens de préservation. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur en Sciences Agronomiques Option ESSA-Forêts. p.64.
75. Robisoa, M.A., (2008) Définition d'un état zéro et mise en place d'un système de suivi écologique permanent de l'arboretum de la station forestière de Mandraka. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Agronome, spécialisation eaux et forêts, p.126.
76. Robisoa, M. A. (2010) Etude des successions végétales des forêts brûlées du Tampoketsa d'ankazobe pour la restauration de la forêt d'Ankafobe. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies en Foresterie-Environnement et Développement, p.131.
77. Scheffer, T.C. & Morrell, J.J. (1998) Natural Durability of Wood: a World Wide Checklist of species. Research Contribution 22, p.62.
78. Schmidt, O. (2007) Indoor wood-decay basidiomycetes: damage, causal fungi, physiology, identification and characterization, prevention and control, Mycol Progress 6 : 261–279.
79. Sen-Sarma, P.K. & Chatterjee, P.N. (1968) Studies on the natural resistance of timbers to termite attack. V. Laboratory evaluation of the resistance of three species of Indian wood to *Microcerotermes beelsoni* Snyder. Indian Forester, 94 : 694-704.
80. Sundararaj, R., Shanbhag R.R., Nagaveni, H.C. & Vijayalakshmi, G. (2015) Natural durability of timbers under Indian environmental conditions, An overview, International Biodeterioration & Biodegradation 103 : 196-214.
81. Tassin, J., Bellefontaine, R., Roger, E. & Kull, C. (2009) Evaluation préliminaire des risques d'invasion par les essences forestières introduites à Madagascar, Bois et Forêts des Tropiques 299 (1) : 27-36.
82. Traore, B. (2008) Influence de la structure anatomique et des métabolites secondaires sur les propriétés physiques et la qualité acoustique du bois de Vène (*Pterocarpus erinaceus* Poir) provenant du Mali. Thèse de doctorat en cotutelle présentée à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec dans le cadre du programme de doctorat en Science du Bois pour l'obtention du grade de Philosophiae doctor, p.205.
83. Van der Hout, P. (2015) Resource Assessment and Forest Management Plan for the CITES-Listed-Species *Cedrela Odorata* (red cedar) In Guyana, Report prepared a part of ITTO Project, p.77.

**ANNEXES**

*Annexe 1 : Disposition des éprouvettes au niveau des deux stations*

Ankatso

				VL1T	La1T	X1T	VL2T	C1T	X2T			
Z1T	Ab1T	Z2T	C2T	VL3T	La2T	C3T	Ag1T	Y1T	La3T	VL4T	Y2T	VL5T
Y3T	X3T	C4T	X4T	VL6T	C5T	La4T	Z3T	Ab2T	Y4T	C6T	X5T	Z4T
Z5T	Y5T	Z6T	VL7T	X6T	La5T	Ag2T	VL8T	C7T	X7T	Y6T	Ab3T	C8T
X8T	C9T	Y7T	La6T	Ab4T	C10T	X9T	Ab5T	Ag3T	Z7T	VL9T	Ab6T	X10T

Mandraka

		La1M	Y1M	VL1M	X1M	
VL2M	X2M	C1M	Ab1M	Y2M	C2M	X3M
X4M	VL3M	Y3M	La2M	Ab2M	Ag1M	Ab3M
VL4M	C3M	La3M	Ag2M	C4M	X5M	Ab4M
VL5M	Ab5M	La4M	Ag3M	La5M	VL6M	Z1M
X6M	Ab6M	X7M	VL7M	La6M	VL8M	C5M
X8M	C6M	Z2M	Y4M	C7M	Z3M	C8M
Z4M	Z5M	C9M	X9M	Y5M	Z6M	Y6M
Z7M	C10M	Z8M	X10M	Z9M	VL9M	X11M

Annexe 2 : Résultats de l'ANOVA sur la comparaison de la perte de masse au niveau échantillon

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	1	4772,945	4772,945	127,359	< 0,0001

Sites / Tukey (HSD) / Analysis of the differences between the categories with a confidence interval of 95%:

Category	Perte de masse	Standard error	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)	Groups
ST	32,75	0,811	31,142	34,356	A
SM	19,81	0,811	18,201	21,415	B

Annexe 3 : Résultats de l'ANOVA sur la comparaison de la perte de masse au niveau espèce Ankatso

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	7	1655,606	236,515	3,199	0,007

ANKATSO / Tukey (HSD) / Analysis of the differences between the categories with a confidence interval of 95%:

Category	fsfdsgs	Standard error	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)	Groups	
CT	59,43	2,719	53,962	64,896	A	
FelT	48,23	3,845	40,495	55,958	A	B
DipT	47,37	2,719	41,905	52,838	A	B
AbT	47,28	3,510	40,219	54,335	A	B
VLT	45,37	2,866	39,610	51,135		B
KijT	45,15	3,250	38,616	51,685		B
LaT	43,04	3,510	35,987	50,102		B
AgT	42,82	4,964	32,844	52,806		B

Mandraka

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	7	2914,286	416,327	7,297	< 0,0001

MANDRAKA / Tukey (HSD) / Analysis of the differences between the categories with a confidence interval of 95%:

Category	PM	Standard error	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)	Groups	
CM	32,95	2,389	28,143	37,748	A	
VLM	32,70	2,518	27,639	37,764	A	

LaM	31,82	3,084	25,624	38,024	A	
AbM	25,35	3,084	19,147	31,548	A	B
DipM	23,77	2,518	18,707	28,832	A	B
AgM	18,61	4,361	9,846	27,383	A	B
FelM	15,99	3,084	9,790	22,190		B
KijM	13,90	2,855	8,163	19,644		B

Annexe 4 : Résultats de l'ANOVA sur la comparaison de l'indice de conservation au niveau échantillon

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	1	3,509	3,509	0,232	0,631

Site / Tukey (HSD) / Analysis of the differences between the categories with a confidence interval of 95%:

Category	PM	Standard error	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)	Groups
ST	90,351	0,515	89,331	91,371	A
SM	90,000	0,515	88,980	91,020	A

Annexe 5 : Résultats de l'ANOVA sur la comparaison de l'indice de conservation au niveau espèce

Ankatso

Source	DF	Sum of squares	Mean squares	F	Pr > F
Model	7	460,760	65,823	2,617	0,022

Espèce-Tana / Tukey (HSD) / Analysis of the differences between the categories with a confidence interval of 95%:

Category	IC	Standard error	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)	Groups
AbT	95,00	2,047	90,886	99,114	A
LaT	93,33	2,047	89,219	97,447	A
AgT	93,33	2,895	87,515	99,152	A
VLT	91,11	1,672	87,752	94,470	A
DipT	90,00	1,586	86,813	93,187	A
KijT	90,00	1,895	86,191	93,809	A
FelT	89,17	2,047	85,053	93,281	A
CT	85,50	1,586	82,313	88,687	B

Annexe 6 : Durée de vie du bois selon la classe de durabilité d'après Beauchêne en 2006

Classes de durabilité	Durées de vie du matériau utilisé en milieu naturel (années)	
	tempéré	tropical
Non durable	<5	<2
Faiblement durable	5 à 10	2 à 5
Moyennement durable	10 à 15	non attribuée
Durable	15 à 25	5 à 10
Très durable	+ de 25	+ de 10

Annexe 7 : Inventaire des agents d'altération du bois

L'inventaire des agents d'altération du bois est conforme à la méthode utilisée par RANDRIANOELY (2015). Il s'agit d'une méthode basée sur une collecte d'échantillons au niveau du site de test.

Les champignons trouvés sur les bois morts ont été photographiés et collectés pour une identification au niveau du CNRE. Pour le cas des insectes, l'inventaire s'est opéré par une capture des insectes trouvés sur les bois morts. Par la suite, les échantillons ont été emmenés auprès du Centre of biodiversity d'Antananarivo pour une identification.