



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE  
D'ANTANANARIVO

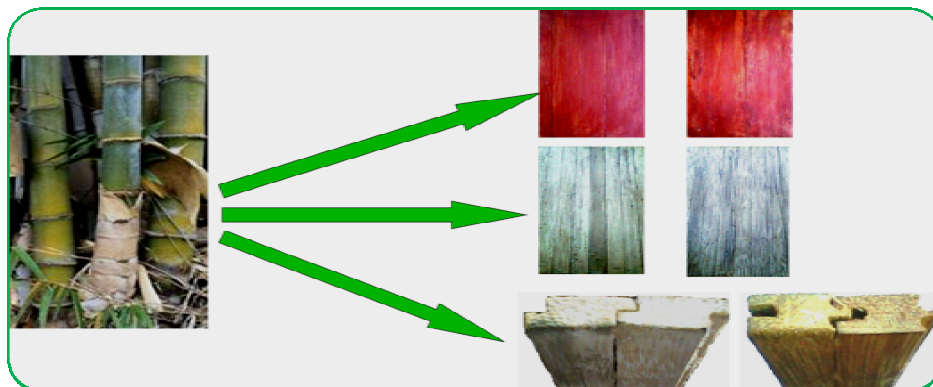


Polytechnique,  
Premier Partenaire  
des Professionnels

DEPARTEMENT SCIENCE DES MATERIAUX ET METALLURGIE  
DEA SCIENCE DES MATERIAUX ET METALLURGIE

*Mémoire de fin d'études en vue d'obtention du Diplôme  
d'Etudes Approfondies en Science des Matériaux et Métallurgie*

CONTRIBUTION A L'ETUDE ET A LA VALORISATION DE  
L'ESPECE DU BAMBOU « *DENDROCALAMUS GIGANTEUS* » OU « *VOLOBE MAVO* » ET  
DE L'ESPECE « *DENDROCALAMUS ASPER* » OU « *VOLOBE AMBIVAHITRA* »



**Présenté par : RAKOTOMANANA Niandry Maminirina**

**Ingénieur Matériaux**

*Soutenu le 16 Décembre 2014*

*Promotion 2013*



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE  
D'ANTANANARIVO



*Polytechnique,  
Premier Partenaire  
des Professionnels*

DEPARTEMENT SCIENCE DES MATERIAUX ET METALLURGIE  
DEA SCIENCE DES MATERIAUX ET METALLURGIE

*Mémoire de fin d'études en vue d'obtention du Diplôme  
d'Etudes Approfondies en Science des Matériaux et Métallurgie*

CONTRIBUTION A L'ETUDE ET A LA VALORISATION DE  
L'ESPECE DU BAMBOU « *DENDROCALAMUS GIGANTEUS* » OU « *VOLOBE MAVO* » ET  
DE L'ESPECE « *DENDROCALAMUS ASPER* » OU « *VOLOBE AMBIVAHITRA* »

*Présenté et soutenu par :*

Monsieur RAKOTOMANANA Niandry Maminirina

Ingénieur Matériaux

*Président du jury :*

Docteur RANDRIANARIVELO Frédéric

*Directeur de mémoire :*

Docteur RAKOTOSAONA Rijalalaina

*Rapporteur de mémoire :*

Professeur ANDRIANARY Philippe

*Membres du jury :*

Docteur ANDRIANAIVORAVELONA Oliva Jaconnet

Docteur RAKOTOARISON Simon

Docteur RANARIVELO Michel

*Soutenu le 16 Décembre 2014*

*Promotion 2013*



# *Remerciements*



*Nous avons pu mener à terme ce travail grâce aux aides et aux collaborations de diverses personnes .*

*C'est dans la plus grande joie que nous adressons ici notre reconnaissance et nos plus vifs remerciements :*

*A notre **Dieu** , source de vie , de santé et de sagesse. A Lui seul la Gloire , la Puissance et la Dignité.*

*Au Professeur **ANDRIANARY Philippe** ,Professeur titulaire, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo qui a bien voulu me permettre de soutenir mon mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Etude Approfondie en Science des Matériaux et d' accepter de rapporter ce travail.*

*Au Docteur **RANDRIANARIVELO Frédéric**, Maître de conférences, Chef du Département Science des Matériaux et Métallurgie de ne pas ménager son effort pour promouvoir le Département Science des Matériaux et qui a accepté de présider ce mémoire.*

*Au Docteur **RAKOTOSAONA Rijalalaina**, Maître de conférences, Enseignant Chercheur et Responsable Partenariat – Projet à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Encadreur de ce travail, d'avoir bien voulu consacrer ses précieux temps pour prodiguer ses conseils et remarques.*

*Au Docteur **ANDRIANAIVORAVELONA Oliva Jaconnet** , Maître de conférences, Enseignant Chercheur à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, au Docteur **RAKOTOARISON Simon**, Maître de conférence et au Docteur **RANARIVELO Michel**, Maître de conférences, Enseignant Chercheur aussi à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo , qui ont accepté de juger ce travail.*

*A toutes les personnes qui m'ont appuyé financièrement et moralement.*

*Merci du fond du cœur !*

# **TABLE DES MATIERES**

**Pages**

## **INTRODUCTION**

## **PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

### **Chapitre I : LE BAMBOU**

<b>I-1 DEFINITION.....</b>	<b>1</b>
<b>I-2 CARACTERISATION DU BAMBOU .....</b>	<b>1</b>
<b>I-2-1 LE RHIZOME .....</b>	<b>2</b>
<b>I-2-2 LE CHAUME.....</b>	<b>4</b>
<b>I-2-3 LES TURIIONS .....</b>	<b>5</b>
<b>I-2-4 LES FEUILLES .....</b>	<b>5</b>
<b>I-2-5 LA FLORAISON.....</b>	<b>6</b>
<b>I-2-6 L'EPILLET.....</b>	<b>6</b>
<b>I-2-7 LES FRUITS.....</b>	<b>7</b>
<b>I-3 ETUDE ANATOMIE DU BAMBOU.....</b>	<b>7</b>
<b>I-3-1 LES PARENCHYMES.....</b>	<b>8</b>
<b>I-3-2 LES VAISSEAUX CONDUCTEURS .....</b>	<b>9</b>
<b>I-4 CROISSANCE DU BAMBOU.....</b>	<b>9</b>

**Chapitre II : LES CARACTERISTIQUES DE L'ESPECE DU BAMBOU  
« DENDROCALAMUS ASPER » ET DE L'ESPECE  
« DENDROCALAMUS GIGANTEUS » DE MADAGASCAR**

<b>II-1 DISTRIBUTION DU MATERIAU BAMBOU DANS LE MONDE ET A MADAGASCAR .....</b>	<b>11</b>
<b>II-2 LOCALISATION ET PRESENTATION DES DEUX ESPECES .....</b>	<b>12</b>
II-2-1 LOCALISATION.....	12
II-2-2 PRESENTATION DES DEUX ESPECES.....	12
a) Dendrocalamus giganteus .....	13
b) Dendrocalamus asper .....	13
<b>II-3 IDENTIFICATION DES CHAUMES MATURES.....</b>	<b>14</b>
II-3-1 LA MATURITE .....	14
II-3-2 LA RECTITUDE .....	15
II-3-3 L'ACCESSIBILITE.....	15
<b>II-4 COUPE DES CHAUMES.....</b>	<b>16</b>
<b>II-5 ANISOTROPIE DU BAMBOU.....</b>	<b>16</b>
<b>II-6 PROPRIETES CHIMIQUES .....</b>	<b>17</b>
a) La cellulose .....	17
b) La lignine.....	18
c) Les hémicelluloses.....	19
<b>II-7 PROPRIETES PHYSIQUES.....</b>	<b>20</b>
II-7-1 TENEUR EN EAU .....	20
II-7-2 DENSITE A 12% D'HUMIDITE .....	20
II-7-3 RETRAIT .....	21
II-7-4 TAUX D'ABSORPTION D'EAU .....	22
<b>II-8 PROPRIETES MECANIQUES .....</b>	<b>22</b>
II-8-1 ESSAI DE FLEXION SIMPLE OU ESSAI DE FLEXION TROIS POINTS .....	22

II-8-2 RESISTANCE AU CHOC OU ESSAI DE RESILIENCE .....	23
--	----

## **Chapitre III : GENERALITES SUR LES RESINES POLYESTERS**

<b>III-1 LES PRINCIPAUX TYPES DE RESINES DE POLYESTERS</b>	
<b>INSATURES .....</b>	<b>24</b>
<b>III-2 CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES .....</b>	<b>25</b>
III-2-1 RESINES POLYMERISEES .....	25
III-2-2 LES PROPRIETES GENERALES DES RESINES	
POLYESTERS.....	25
III-2-3 PROPRIETES PHYSIQUES.....	25
a) Densité.....	25
b) Retrait .....	25
c) Indice de réfraction .....	25
d) Dureté .....	26
III-2-4 PROPRIETES MECANIQUES .....	26
a) Résistance en flexion.....	26
b) Résistance en traction.....	26
c) Allongement à la rupture .....	26
d) Module d'Young.....	26
e) Résistance en compression .....	26
f) Résistance au choc.....	26
III-2-5 TENUE CHIMIQUE.....	27
III-2-6 TENUE AU FEU .....	28
<b>III-3 COPOLYMERISATION DES RESINES POLYESTERS INSATURES</b>	
a) Les catalyseurs.....	28
b) Les accélérateurs .....	30
III-3-1 COPOLYMERISATION A FROID.....	30
III-3-1-1 GENERALITES .....	30
III-3-1-2 DEFINITONS.....	31

a) Durée de conservation (pot-life).....	31
b) Temps de gel ou de gélification .....	31
c) Temps de polymérisation.....	31
d) Cadence .....	32
III-3-2 COPOLYMERISATION A CHAUD .....	32
III-3-2-1 GENERALITES .....	32
III-3-2-2 DEFINITIONS.....	33
a) Durée de conservation (pot-life).....	33
b) Temps de gel ou de gélification .....	33
c) Cadence .....	33
III-4 POSSIBILITES DE LA RESINE POLYESTER INSATURE .....	36

## **PARTIE II : ETUDES EXPERIMENTALES**

### **Chapitre IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

<b>IV-1 PARAMETRE SUIVANT LES TROIS PARTIES DU BAMBOU.....</b>	<b>37</b>
IV-1-1 TAUX D'HUMIDITE .....	37
IV-1-2 DENSITE A 12% D'HUMIDITE .....	38
IV-1-3 RETRAIT .....	39
IV-1-4 TAUX D'ABSORPTION .....	40
IV-1-5 RESISTANCE A LA FLEXION.....	41
IV-1-6 RESISTANCE AU CHOC .....	42
<b>IV-2 PARAMETRE SUIVANT L'AGE .....</b>	<b>43</b>
IV-2-1 TAUX D'HUMIDITE .....	43
IV-2-2 DENSITE A 12% D'HUMIDITE .....	44
IV-2-3 RETRAIT .....	45
IV-2-4 TAUX D'ABSORPTION .....	46
IV-2-5 RESISTANCE A LA FLEXION.....	47
IV-2-6 RESISTANCE AU CHOC .....	48
<b>IV-3 COMPARAISON DES DEUX ESPECES .....</b>	<b>49</b>
IV-3-1 LES TYPES DE BOIS.....	49
a) Le bois « kesika » .....	49
b) Le bois « Varongy» .....	49
c) Le bois « kininina » .....	50

d) Le bois « longotra » .....	50
e) Le bois « Voamboana de Moramanga ».....	51

IV-3-2 CLASSIFICATION SELON LA DENSITE.....	52
---	----

IV-3-3 CLASSIFICATION SELON RESISTANCE A LA FLEXION .....	52
--	----

## **Chapitre V : TRAITEMENTS DU BAMBOU ET APPLICATIONS**

<b>V-1 TRAITEMENT A L'EAU DE CHAUX .....</b>	<b>54</b>
--	-----------

MODE OPERATOIRE

<b>V-2 THEORIE DE COUPE DES CHAUMES DE BAMBOU .....</b>	<b>57</b>
---	-----------

<b>V-3 ENCOLLAGE.....</b>	<b>58</b>
---------------------------	-----------

a) Résine.....	58
----------------	----

b) Catalyseur.....	59
--------------------	----

V-3-1 MISE EN ŒUVRE DU COLLAGE .....	60
--------------------------------------	----

V-3-2 PROCESSUS DU COLLAGE.....	60
---------------------------------	----

<b>V-4 TRAITEMENT DU BAMBOU DE LA RESINE POLYESTER .....</b>	<b>61</b>
--	-----------

V-4-1 RESISTANCE A LA FLEXION .....	61
-------------------------------------	----

V-4-2 TEST DE RESISTANCE A L'EAU.....	62
---------------------------------------	----

a) Résultat sur le taux d'absorption.....	63
---	----

b) Résultat sur le test de flexion .....	64
--	----

<b>V-5 TEST DE FLUAGE.....</b>	<b>64</b>
--------------------------------	-----------

<b>V-6 ASSEMBLAGE DES BAMBOUS .....</b>	<b>65</b>
---	-----------

a) Assemblage simple .....	65
----------------------------	----

b) Assemblage à rainure languette.....	66
--	----

c) Assemblage à mi-bois.....	66
------------------------------	----

<b>V-7 APPLICATIONS DES BAMBOUS .....</b>	<b>66</b>
---	-----------

<b>V-8 AVANTAGE DES PRODUITS EN BAMBOU.....</b>	<b>68</b>
---	-----------

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

# LISTE DES ANNEXES

## Pages

### ANNEXE I

<b>A-1 DIMENSIONNEMENT DES ECHANTILLONS</b> .....	A
a) Abattage des bambous .....	C
b) Coupage des chaumes .....	C
c) Passage des sections à la scie circulaire.....	D
d) Dégauchissage .....	E
e) Rabotage .....	F
<b>A-2 POUR LES CARACTERISATIONS PHYSIQUES</b> .....	H
A-2-1 TENEUR EN EAU (NF B 51-004) .....	H
A-2-2 DENSITE A 12% D'HUMIDITE (NF B 51-005) .....	I
A-2-3 RETRAIT (NF B 51-006) .....	J
A-2-4 TAUX D'ABSORPTION D'EAU .....	K
<b>A-3 POUR LES CARACTERISATIONS MECANIQUES</b> .....	L
A-3-1 ESSAIS FLEXION TROIS POINTS (NF B 51-008) .....	L
A-3-2 RESTISTANCE AU CHOC (NF B 51-009) .....	M

### ANNEXE II

<b>A-4 LE CALIBRE A COULISSE OU PIED A COULISSE</b>	
A-4-1 FONCTION .....	O
A-4-2 CONSTITUTION .....	O
A-4-3 CARACTERISTIQUES .....	O
A-4-4 LECTURE AU VERNIER .....	P
A-4-5 MODE OPERATOIRE D'UTILISATION DU CALIBRE A COULISSE .....	Q

### ANNEXE III

CARACTERISTIQUE DE LA RESINE POLYESTER UTILISEE.....	R
--	---

### ANNEXE IV

CARACTERISTIQUE DU CATALYSEUR UTILISE.....	S
--	---

# LISTE DES FIGURES

	Pages
<i>Figure I.1 : Les différentes parties du bambou</i> .....	1
<i>Figure I.2 : Rhizome pachymorphe du bambou</i> .....	2
<i>Figure I.3 : Rhizome leptomorphe du bambou</i> .....	3
<i>Figure I.4 : Caractéristiques du chaume et des feuilles</i> .....	5
<i>Figure I.5 : Représentation des parenchymes sur les deux espèces</i> .....	8
<i>Figure I.6 : Coupe de vaisseaux vasculaire du Dendrocalamus Asper</i> .....	9
<i>Figure II.1 : Distribution mondiale des bambous à Madagascar</i> .....	11
<i>Figure II.2 : Richesse potentielle du bambou</i> .....	12
<i>Figure II.3 : La connaissance de l'âge selon les ramifications</i> .....	15
<i>Figure II.4 : Les différentes coupes de chaumes selon les trois parties :</i> <i>inférieure, moyenne, supérieure</i> .....	16
<i>Figure II.5 : Anisotropie du bambou</i> .....	17
<i>Figure II.6 : Essai de flexion simple</i> .....	22
<i>Figure III.1 : Réaction de polymérisation à froid,</i> <i>courbe de montée en Température</i> .....	30
<i>Figure III.2 : Réaction de polymérisation à chaud,</i> <i>courbe de montée en Température</i> .....	32
<i>Figure III.3 : Durée de gélification pour une résine isophtalique</i> <i>pour moulage au contact en fonction de la température,</i> <i>pour différentes proportions de peroxyde de MEK</i> .....	34
<i>Figure III.4 : Durée de gélification pour une résine isophtalique</i> <i>pour moulage au contact à 20°C et à 25°C, pour différentes</i> <i>proportions de peroxyde de benzoyle à</i> <i>50% et de diméthylaniline</i> .....	35
<i>Figure IV.1 : Histogramme montrant la variation du taux</i> <i>d'humidité des deux espèces suivant la hauteur des chaumes</i> .....	37
<i>Figure IV.2: Histogramme montrant la variation</i> <i>de la densité des deux espèces suivant la hauteur des chaumes</i> .....	38
<i>Figure IV.3: Histogramme montrant la variation des retraits</i> <i>dimensionnels des deux espèces suivant la hauteur des chaumes</i> .....	39



<u>Figure IV.4:</u>	<i>Histogramme montrant la variation du taux d'absorption des deux espèces suivant la hauteur des chaumes.....</i>	<i>40</i>
<u>Figure IV.5:</u>	<i>Histogramme montrant la variation de la résistance à la flexion des deux espèces suivant la hauteur des chaumes .....</i>	<i>41</i>
<u>Figure IV.6:</u>	<i>Histogramme montrant la variation de la résistance au choc des deux espèces, de la couche extérieure vers l'intérieure et de la couche intérieure vers l'extérieure, suivant la hauteur des chaume.....</i>	<i>42</i>
<u>Figure IV.7 :</u>	<i>Histogramme montrant la variation du taux d'humidité des deux espèces suivant l'âge.....</i>	<i>43</i>
<u>Figure IV.8 :</u>	<i>Histogramme montrant la variation de la densité des deux espèces suivant l'âge.....</i>	<i>44</i>
<u>Figure IV.9 :</u>	<i>Histogramme montrant la variation des retraits dimensionnels des deux espèces suivant l'âge .....</i>	<i>45</i>
<u>Figure IV.10 :</u>	<i>Histogramme montrant la variation du taux d'absorption des deux espèces suivant l'âge .....</i>	<i>46</i>
<u>Figure IV.11 :</u>	<i>Histogramme montrant la variation de la résistance à la flexion des deux espèces suivant l'âge.....</i>	<i>47</i>
<u>Figure IV.12:</u>	<i>Histogramme montrant la variation de la résistance au choc des deux espèces suivant l'âge .....</i>	<i>48</i>
<u>Figure IV.13:</u>	<i>Histogramme montrant les valeurs de la densité des deux espèces à trois ans comparées avec les types de bois .....</i>	<i>52</i>
<u>Figure IV.14:</u>	<i>Histogramme montrant les valeurs de la résistance à la flexion deux espèces à trois ans comparées avec les types de bois .....</i>	<i>53</i>
<u>Figure V.1:</u>	<i>Histogramme montrant les valeurs de la résistance à la flexion deux espèces traitées avec le polyester .....</i>	<i>61</i>
<u>Figure V.2:</u>	<i>Histogramme montrant les valeurs du taux d'absorption d'eau deux espèces traitées avec le polyester.....</i>	<i>63</i>
<u>Figure V.3:</u>	<i>Histogramme montrant les valeurs de la résistance à la flexion des deux espèces traitées avec le polyester après l'immersion dans l'eau .....</i>	<i>64</i>
<u>Figure A.1:</u>	<i>Dimensionnement des échantillons .....</i>	<i>A</i>
<u>Figure A.2 :</u>	<i>Protocole d'usinage des chaumes .....</i>	<i>B</i>
<u>Figure A.3 :</u>	<i>Graduation du vernier 1/50 .....</i>	<i>P</i>
<u>Figure A.4 :</u>	<i>Mode Opératoire d'utilisation du calibre à coulisse.....</i>	<i>Q</i>

## **LISTE DES TABLEAUX**

**Page**

<u>Tableau II.1</u> :Distribution mondiale du bambou .....	11
<u>Tableau III.1</u> : Principaux avantages et limites d'utilisation.....	36
<u>Tableau IV.1</u> : Variation du taux d'humidité des deux espèces suivant la hauteur des chaumes .....	37
<u>Tableau IV.2</u> : Variation de la densité des deux espèces suivant la hauteur des chaumes.....	38
<u>Tableau IV.3</u> : Variation des retraits dimensionnels des deux espèces suivant la hauteur des chaumes .....	39
<u>Tableau IV.4</u> : Variation du taux d'absorption des deux espèces suivant la hauteur des chaumes .....	40
<u>Tableau IV.5</u> : Variation de la résistance à la flexion des deux espèces suivant la hauteur des chaumes .....	41
<u>Tableau IV.6</u> : Variation de la résistance au choc des deux espèces, de la couche extérieure vers l'intérieure et de la couche intérieure vers l'extérieure, suivant la hauteur des chaumes .....	42
<u>Tableau IV.7</u> : Variation du taux d'humidité des deux espèces suivant l'âge .....	43
<u>Tableau IV.8</u> : Variation de la densité des deux espèces suivant l'âge .....	44
<u>Tableau IV.9</u> : Variation des retraits dimensionnels des deux espèces suivant l'âge .....	45
<u>Tableau IV.10</u> :Variation du taux d'absorption des deux espèces suivant l'âge .....	46
<u>Tableau IV.11</u> :Variation de la résistance à la flexion des deux espèces suivant l'âge .....	47
<u>Tableau IV.12</u> :Variation de la résistance au choc des deux espèces suivant l'âge .....	48
<u>Tableau IV.13</u> :Valeurs de la densité des deux espèces à trois ans comparées avec les types de bois .....	52
<u>Tableau IV.14</u> :Valeurs de la résistance à la flexion des deux espèces .....	52
<u>Tableau V.1</u> : Caractéristique de la résine utilisée .....	58
<u>Tableau V.2</u> : Caractéristique du catalyseur utilisé .....	59
<u>Tableau V.3</u> : Valeurs de la résistance à la flexion des deux espèces traitées avec le polyester .....	61
<u>Tableau V.4</u> : Valeurs du taux d'absorption d'eau des deux espèces traitées avec le polyester .....	63
<u>Tableau V.5</u> : les valeurs de la résistance à la flexion des deux espèces traitées avec le polyester après l'immersion d'ans l'eau .....	64

# LISTE DES PHOTOS

	<b>Page</b>
<i>Photo I.1: Représentation des nœuds et des entre-nœuds de l'espèce Dendrocalamus giganteus</i> .....	4
<i>Photo I.2 : floraison du bambou</i> .....	6
<i>Photo I.3 : graine du bambou</i> .....	7
<i>Photo II.1 : Représentation de l'espèce dendrocalamus giganteus à l'âge 1an et 3ans</i> .....	13
<i>Photo II.2 : Représentation de l'espèce dendrocalamus asper</i> .....	14
<i>Photo II.3 : Représentation des deux espèces dendrocalamus asper et giganteus à l'âge 1an et 3ans</i> .....	14
<i>Photo II.4 : Représentation du bambou avec ses trois directions : longitudinale , tangentielle, radiale</i> .....	21
<i>Photo IV.1: Le bois « kesika »</i> .....	49
<i>Photo IV.2: Le bois « varongy »</i> .....	49
<i>Photo IV.3: Le bois « kininina »</i> .....	50
<i>Photo IV.4: Le bois « longotra»</i> .....	50
<i>Photo IV.5: Le bois « Voamboana»</i> .....	51
<i>Photo V.1: La représentation des moisissures des bambous non traités</i> .....	54
<i>Photo V.2 : La chaux</i> .....	55
<i>Photo V.3 : Le lait de chaux après une décantation de 24 heures</i> .....	56
<i>Photo V.4 : Imprégnation des bambous fraîchement coupés dans l'eau de chaux pendant une semaine (trempage)</i> .....	56
<i>Photo V.5 : Séchage des bambous traités avec l'eau de chaux à température ambiante</i> .....	57
<i>Photo V.6: coupe des chaumes de bambou avec l'angle et la largeur</i> .....	57
<i>Photo V.7: La résine polyester insaturé et son catalyseur avec la sciure du bambou qui est utilisé comme charge</i> .....	60
<i>Photo V.8: Protocole pour le traitement du bambou avec la résine polyester</i> .....	61
<i>Photo V.9: Immersion des échantillons en bambou traités avec du polyester dans l'eau pendant 7 jours</i> .....	62

<i>Photo V.10: La forme de l'échantillon en bambou traité avec du polyester après l'immersion dans l'eau et sa forme après son séchage .....</i>	<i>63</i>
<i>Photo V.11: Test de fluage .....</i>	<i>65</i>
<i>Photo V.12: Assemblage simple .....</i>	<i>65</i>
<i>Photo V.13: Assemblage à mi-bois .....</i>	<i>66</i>
<i>Photo V.14: Assemblage à rainure languette .....</i>	<i>66</i>
<i>Photo V.15: Le plancher .....</i>	<i>66</i>
<i>Photo V.16: Le parquet .....</i>	<i>67</i>
<i>Photo V.17: La volige .....</i>	<i>67</i>
<i>Photo V.18: Le contreplaqué .....</i>	<i>67</i>
<i>Photo V.19: Le lamellé collé .....</i>	<i>68</i>
<i>Photo A.1 : Coupes des nœuds avec la scie à ruban .....</i>	<i>C</i>
<i>Photo A.2: Les entrenœuds des bambous après le sciage .....</i>	<i>C</i>
<i>Photo A.3: La machine à scie circulaire .....</i>	<i>D</i>
<i>Photo A.4: Opération sur la machine à scie circulaire .....</i>	<i>D</i>
<i>Photo A.5: La forme obtenue après le passage sur la machine à scie circulaire .....</i>	<i>E</i>
<i>Photo A.6: La machine dégauchisseuse .....</i>	<i>E</i>
<i>Photo A.7: L'Opération dégauchissage .....</i>	<i>F</i>
<i>Photo A.8: La rectification .....</i>	<i>F</i>
<i>Photo A.9: La machine raboteuse .....</i>	<i>F</i>
<i>Photo A.10: L'Opération rabotage .....</i>	<i>G</i>
<i>Photo A.11: Les plaquettes des bambous pour les essais .....</i>	<i>G</i>
<i>Photo A.12: Le protocole pour la mesure du taux d'humidité .....</i>	<i>H</i>
<i>Photo A.13: Le protocole pour la mesure de la densité .....</i>	<i>I</i>
<i>Photo A.14: Le protocole pour la mesure des retraits dimensionnels .....</i>	<i>J</i>
<i>Photo A.15: Le protocole pour la mesure du taux d'absorption .....</i>	<i>K</i>
<i>Photo A.16: La machine Testwell universelle .....</i>	<i>L</i>
<i>Photo A.17: La mesure de la résistance à la flexion .....</i>	<i>L</i>
<i>Photo A.18: Aguille de la machine TESTWELL universelle .....</i>	<i>M</i>
<i>Photo A.19: La machine mouton-pendule CHARPY .....</i>	<i>M</i>
<i>Photo A.20: Le protocole pour la mesure de la résistance au choc .....</i>	<i>N</i>
<i>Photo A.21: Constitution du pied à coulisse .....</i>	<i>N</i>

# *Introduction*

Actuellement dans le cadre de l'environnement durable, les matériaux issus de ressources renouvelables sont de plus en plus recherchés que ce soit en produit de qualité, en architecture et en construction. Parmi ces ressources on trouve le bambou. Le bambou est extrêmement résistant et sa croissance est rapide. De plus, il absorbe du dioxyde de carbone à taux élevé car un hectare de bambou peut stocker 90 tonnes de CO<sub>2</sub>. Du côté utilisation, le bambou présente une meilleure propriété mécanique, c'est pour cela que son application dans le milieu de la construction se développe rapidement.

Dans la région d'Atsinanana, plus précisément à Fénerive-Est, l'espèce du bambou « *Dendrocalamus giganteus* », connue sous le nom « *Volobe Mavo* », et l'espèce « *Dendrocalamus asper* », connue sous le nom « *Volobe Ambivahitra* », sont parmi les bambous géants de Madagascar. Ces deux espèces sont caractérisées par leurs grands diamètres et leurs grosses épaisseurs. Elles sont très employées dans le domaine de la construction dans la région.

L'objectif de ce travail intitulé : « Contribution à l'étude et à la valorisation de l'espèce du bambou « *dendrocalamus giganteus* » ou « *volobe mavo* » et de l'espèce « *dendrocalamus asper* » ou « *volobe ambivahitra* », est d'étudier les propriétés physiques et les propriétés mécaniques de ces deux espèces suivant les trois parties du bambou : partie inférieure, partie moyenne, partie supérieure ou suivant l'hauteur des chaumes et suivant l'âge du bambou en vue de les valoriser en matériau de construction de qualité.

Ce travail est divisé en deux grandes parties :

- la première partie constituée de trois chapitres, qui traitera : le bambou, les caractéristiques de l'espèce du bambou « *dendrocalamus asper* » et de l'espèce « *dendrocalamus giganteus* » de Madagascar et enfin les résines polyesters insaturés.
- la deuxième partie composée de deux chapitres qui traiteront successivement : les résultats obtenus et les interprétations, les traitements et les applications des bambous transformés.

# PARTIE I

## *Etude bibliographique*

# CHAPITRE I

## *Le bambou*



Dans ce premier chapitre, nous allons traiter les différentes parties de bambou et l'étude anatomique.

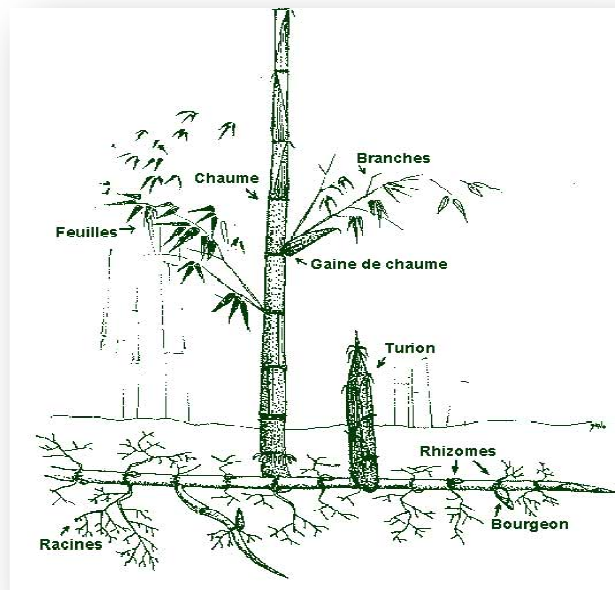
### I-1 DEFINITION

Le bambou appartient à la famille des graminées, monocotylédones de la famille des Poacées (tels le blé, le riz, le maïs), sous-famille des Bambusoïdées. Cette sous-famille regroupe entre 1400 et 1500 espèces réparties entre 60 et 90 genres de bambous différents. Ils sont composés de quatre parties; les rhizomes, les chaumes, les branches, et les feuilles (Hargot B , 2009).

### I-2 CARACTERISATION DU BAMBOU

Le bambou comprend :

- un rhizome (tige souterraine)
- une tige ou chaume (partie aérienne) qui comprend des nœuds et entrenœuds en fonction de variétés, ceci afin de stabiliser la tige ou chaume.
- des branches ou rameaux qui poussent sur la tige (chaume) une fois sa croissance terminée
- des feuilles portées par les branches, jamais par la tige principale (chaume)



***Figure I.1 : Les différentes parties des bambous***

### **I-2-1 LE RHIZOME**

Tous les bambous ont des tiges souterraines, appelées rhizome, il se développe à partir d'un bourgeon souterrain de la plantule ou du rhizome mère.

Il est composé de deux parties :

- La partie liée au chaume, appelée cou du rhizome qui est caractérisée par des entre-noeuds courts et irréguliers.
- Le rhizome proprement dit peut être court ou long, creux ou plein.

Il existe deux types de rhizomes selon leur mode de croissance :

- les rhizomes pachymorphes qui sont courts et épais, à croissance sympodiale et qui se rencontrent chez les bambous cespiteux (*Bambusa glaucescens*, *Bambusa vulgaris*, *Fargesia murielae*, *Fargesia nitida*),



Figure du rhizome sympodial à cou long

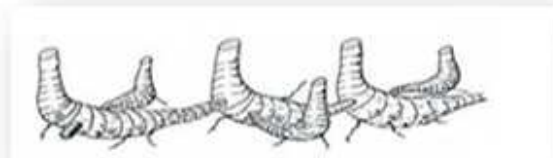


Figure du rhizome sympodial à cou court

#### **Figure I.2 : Rhizome pachymorphe du bambou**

- les rhizomes leptomorphes sont longs et minces et à croissance monopodiale se rencontrent chez les bambous traçants (*Semiarundaria*, *Sasa*, *Pleioblastus*).



**Figure I.3 : Rhizome leptomorphe du bambou**

Chaque nœud du rhizome porte une petite feuille en forme de gaine appelée gaine de rhizome. Les gaines varient progressivement en fonction du diamètre de l'axe. Elles sont entrecroisées: c'est-à-dire imbriquées enveloppantes chez les rhizomes pachymorphes. Chez les rhizomes leptomorphes, elles sont plus ou moins espacées.

Du côté protection du sol, le rhizome :

- ✚ évite les glissements de terrain et l'érosion du sol en le stabilisant
- ✚ redonne rapidement une couche végétale sur le sol déboisé
- ✚ Ils permettent d'aérer le sol avec son vaste réseau racinaire

Les rhizomes donnent naissance, dans les deux cas, à de jeunes pouces de forme conique très pointue (appelées les turions) qui sortent de terre directement à côté des chaumes existants.

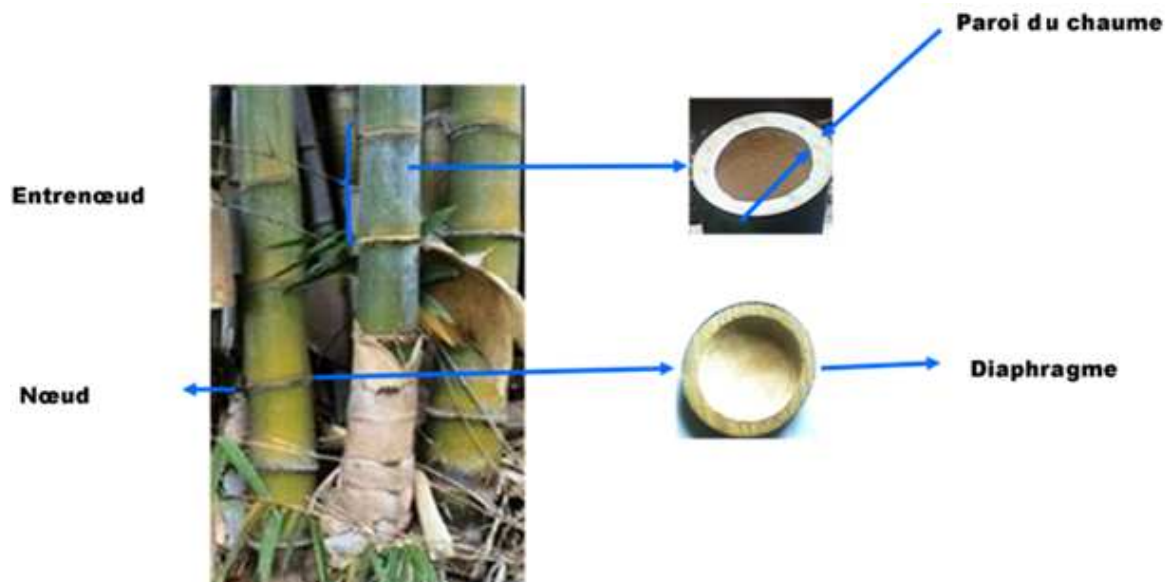
### I-2-2 LE CHAUME

La tige principale est un « chaume » ou canne, lignifié, fistuleux (c'est-à-dire en tube), et formé par des sections creuses, ou « entrenœuds », séparés par des diaphragmes formant ainsi les nœuds

Les nœuds sont les anneaux qui se succèdent plus ou moins régulièrement sur le chaume. Chaque nœud abrite un ou plusieurs bourgeons qui, en se développant, vont donner les ramifications. Il arrive souvent que, dans les parties inférieures des chaumes, les bourgeons ne se développent pas et ne soient même plus perceptibles.

La cicatrice visible aux nœuds est la trace de la gaine des feuilles tombées. Le chaume peut se diviser en rameaux feuillés, eux-mêmes divisés en remuscles. Le bois des chaumes, riches en silice, est particulièrement dur et résistant.

La taille des tiges fluctue selon les espèces de moins d'un mètre à près de 10 m. La vitesse de croissance peut chez certaines espèces être spectaculaire, jusqu'à un mètre par jour. Les chaumes se balancent au vent fort et se plient sous le poids de la neige mais ils se cassent rarement. Cette flexibilité est due aux entrenœuds creux de chacun des chaumes. Chaque nœud est muni d'un bourgeon qui peut se développer en donnant soit une branche, soit une inflorescence.



***Photo I.1: Représentation des nœuds et des entre-nœuds de l'espèce *Dendrocalamus giganteus****

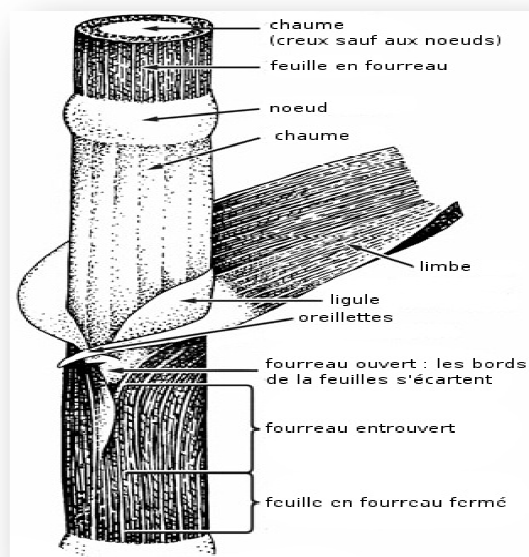
### I-2-3 LES TURIONS

Les turions sont recouverts de gaines robustes qui les protègent des prédateurs et au sommet desquels se trouve une languette ou encore des faisceaux de languettes. Quand la tige devient assez dure, les gaines tombent et on peut alors observer les nœuds rythmant régulièrement le chaume de bas en haut. Les chaumes ressemblent ainsi à des successions de tubes fermés car ils sont pour la plupart constitués d'une tige creuse et de nœuds pleins.

### I-2-4 LES FEUILLES

Le bambou possède deux types de feuilles. Tout d'abord des feuilles « gaines » qui sont présentes à différentes parties de la plante. Dans un premier temps, elles forment une gaine de protection autour du rhizome. Une fois que ce dernier sort du sol pour devenir un chaume, les feuilles se développent suivant le même schéma qu'une herbe et finissent par tomber. Les légères entailles visibles sous les nœuds sont des traces de la gaine de feuilles qui entourait le chaume. Comme pour toutes les graminées, ces feuilles possèdent certaines caractéristiques présentées sur la figure ci-dessous. Elle comprend : des oreillettes plus ou moins développées, le pétiole assez court, le limbe particulièrement allongé, à nervures parallèles, partie la plus apparente de la feuille.

En convertissant la lumière du soleil en énergie, les feuilles assurent la fonction de photosynthèse de la plante. L'apparition des feuilles joue un rôle important dans l'identification de l'espèce. En effet, dans certaines espèces, les feuilles sont très grandes et moins nombreuses, tandis que d'autres espèces ont une grande quantité de très petites feuilles.



**Figure I.4 :** *Caractéristiques du chaume et des feuilles*

### I-2-5 LA FLORAISON

La floraison des bambous présente des caractéristiques particulières, qui ne sont cependant pas toujours vérifiées. Elle n'est pas régulière et souvent espacée de plusieurs dizaines d'années. Le record est détenu par le bambou à tiges noires, dont la dernière floraison remonte à 1920. Pour une même espèce de bambou donnée, elle se produit simultanément dans toute une région, voire dans le monde entier, quel que soit l'âge de la plante ; les chaumes se dessèchent et meurent après avoir fleuri.

Les fleurs, plutôt rares, apparaissent à l'aisselle des feuilles, aussi bien sur des tiges jeunes que sur des tiges âgées. Elles sont groupées en épillets.



***Photo I.2 : floraison du bambou***

### I-2-6 L'ÉPILLET

L'épillet est un épi, réduit à quelques fleurs incomplètes jusqu'à une dizaine souvent 2 à 3, parfois une seule selon les espèces. Il se compose d'un axe appelé « rachillet », inséré dans l'inflorescence principale soit par un pédoncule plus ou moins long (épillet pédicelle) soit souvent sans pédoncule (épillet sessile) sur cet axe s'insèrent selon une disposition alternée, des axes secondaires qui sont les axes floraux en nombre variable. Les épillets sont regroupés eux même en épis (cas du blé) ou en panicules (cas de l'avoine). Le nombre de fleurs est caractéristique de chaque espèce. Les épillets sont fréquemment uniflores (orge marine) ou bi flores (houlque lainée) ; mais ils peuvent aussi compter plus d'une dizaine de fleurs (brome stériles) il peut aussi y avoir des fleurs stériles.

L'inflorescence élémentaire est caractéristique de la famille des Poacées et de la famille voisine des Cypéracées.

### **I-2-7 LES FRUITS**

Les fruits du bambou sont généralement des caryopses (fruits caractéristiques des graminées) à ouverture non spontanée et qui ne comportent qu'une seule graine. Semblables à des grains de blés, il existe cependant des différences dans la micromorphologie des graines. Des disparités existent également entre les espèces de bambou



***Photo I.3** : graine du bambou*

### **I-3 ETUDE ANATOMIE DU BAMBOU**

Cette partie reflète une certaine importance du fait que l'interprétation se base sur la composition cellulaire des bambous.

Malgré le fait que le bambou est une graminée, il a plusieurs similarités avec le bois. La constitution cellulaire et les propriétés du bambou ressemblent à la structure du bois excepté l'absence de croissance secondaire (pas de cambium et pas de rayons).

Les propriétés du chaume sont déterminées par son structure anatomique. Le chaume se compose des entre-nœuds et des nœuds. Aux entre-nœuds, les cellules sont axialement orientées, tandis qu'aux nœuds, les cellules fournissent les intercommunications transversales.

La partie externe du chaume est constituée par deux couches épidermiques de cellules, l'intérieur apparaissant plus profondément et lignifié fortement. La surface des cellules extérieures sont couvertes par une couche cireuse de couleur blanche.

Et la partie interne de bambou est constituée d'épiderme, de parenchyme, de tissus structuraux et mécaniques, de tissus conducteurs et des cellules méristématiques. Un chaume



est constitué en moyenne d'environ 50% de parenchyme, 40% de fibres et 10% de cellules conductrices, les autres tissus étant négligeables

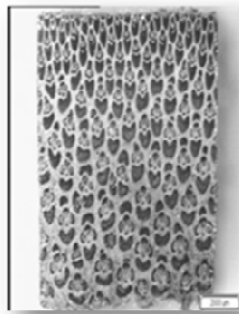
### **I-3-1 LES PARENCHYMES**

Les tissus structuraux et mécaniques sont divisés en deux catégories : le collenchyme et le sclérenchyme. Les cellules collenchymateuses sont allongées et vivantes ; elles ont une paroi épaisse qui leur permet de soutenir les jeunes organes en développement.

Le sclérenchyme renforce et soutient les parties de la plante qui ne s'allongent pas. Les cellules sclérenchymateuses sont mortes et allongées : ce sont les fibres de la plante.

A l'âge adulte, leur pourcentage est largement supérieur aux cellules collenchymateuses. Les fibres sont longitudinales et serrées ce qui confère à la plante sa souplesse, sa flexibilité, son élasticité et sa grande résistance en traction. Elles occupent 40% de la paroi et sont disposées autour des vaisseaux conducteurs. On distingue la partie interne de la tige qui représente 70% de l'épaisseur et la partie externe de la tige.

Le pourcentage de fibres est supérieur dans la partie extérieure du chaume qui est ainsi plus résistante tant en flexion qu'en traction.



**Section transversale des tissus des parenchymes du dendrocalamus aper**



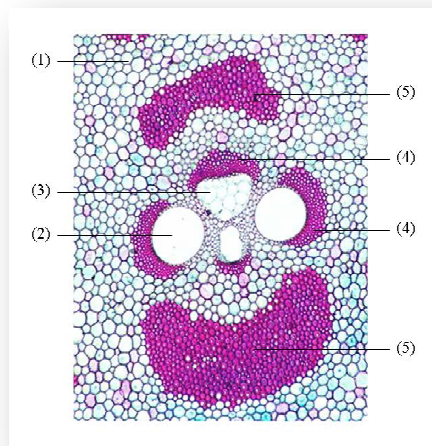
**Section longitudinale des tissus des parenchymes du dendrocalamus giganteus**

***Figure I.5 : Représentation des parenchymes sur les deux espèces***



### **I-3-2 LES VAISSEAUX CONDUCTEURS**

Les vaisseaux vasculaires qui permettent la conduite de la sève dans toute la plante sont actifs tout au long de la vie du bambou. Ils sont longitudinaux sans contacts entre eux sauf au niveau des nœuds où des jonctions permettent la circulation de la sève dans le sens horizontal. Le xylème conducteur est constitué d'un ou deux protoxylèmes et de deux grands vaisseaux de métaxylème. Les protoxylèmes ont une membrane simple alors que les métaxylèmes ont une double membrane. Le phloème se compose des grands tubes à parois minces de passoir, parmi lesquels de plus petites cellules de compagnon sont distribuées.



- 1 : parenchymes
- 2 : vaisseaux métaxylème
- 3 : vaisseau du phloème
- 4 : cellules sclérenchymateuses
- 5 : Fibre

***Figure I.6 : Coupe de vaisseau vasculaire du Dendrocalamus asper***

### **I-4 CROISSANCE DU BAMBOU**

Le bambou est une espèce à croissance rapide et une ressource renouvelable de rendement élevé. La croissance en bambou dépend de l'espèce, mais généralement tout le bambou mûrit rapidement. La croissance rapide caractéristique du bambou est une incitation importante pour son utilisation. En raison de l'utilisation en bambou dans l'industrie bois-composée, la croissance et le développement du chaume en bambou sont regardés avec le grand intérêt.

A la différence des arbres, les bambous deviennent la pleine taille et de périmètre dans une seule saison de croissance.

La croissance de taille du chaume en bambou est réalisée par la croissance d'entre-nœuds. La division de cellules change avec la différente place d'entre-nœud. La vitesse de la croissance est également différente dans les entre-nœuds. Après la fin de la croissance de taille, d'épaisseur, le volume de tiges en bambou est constant.

En conséquence, le processus de maturité commence. Dans cette durée, le mur de cellules s'épaissit et la densité augmente, le contenu d'humidité diminue et les propriétés physiques et mécaniques augmentent.

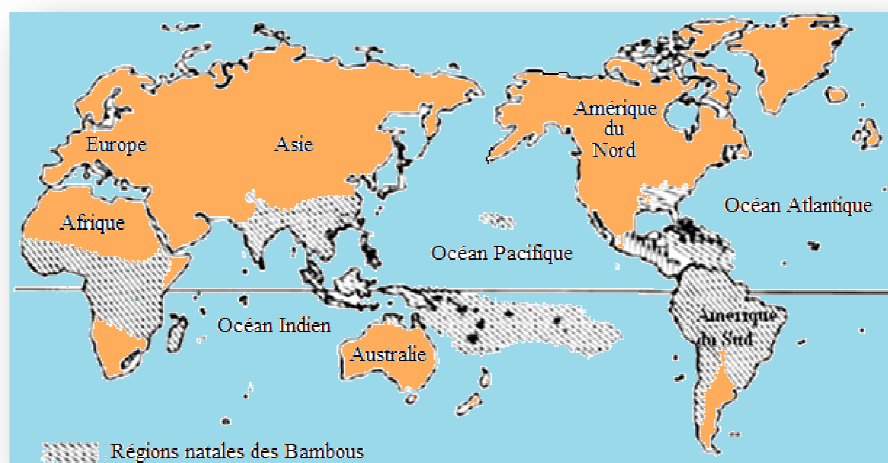
# CHAPITRE II

*Les caractéristiques de l'espèce du bambou  
" dendrocalamus asper "et "dendrocalamus giganteus"  
de Madagascar*

## *Chapitre II : Les caractéristiques de l'espèce du bambou « dendrocalamus asper » et de l'espèce « dendrocalamus giganteus » de Madagascar*

### **II-1 DISTRIBUTION DU MATERIAU BAMBOU DANS LE MONDE ET A MADAGASCAR**

Contrairement à ce que de nombreuses personnes pensent, le bambou ne se limite pas au continent asiatique. Même si les différentes espèces du bambou sont majoritairement originaires d'Asie, elles proviennent également d'Amérique. De plus, le bambou se développe naturellement sur tous les continents, excepté l'Europe et l'Antarctique. En effet, il s'est adapté à une multitude de climats et fait partie d'écosystèmes très variés : des forêts d'Afrique jusqu'à 3000 m dans l'Himalaya. Comme la montre la figure ci-dessous, l'aire de répartition du bambou s'étend du 40<sup>ème</sup> parallèle Nord au 40<sup>ème</sup> parallèle Sud.



**Figure II.1 : Distribution mondiale des bambous**

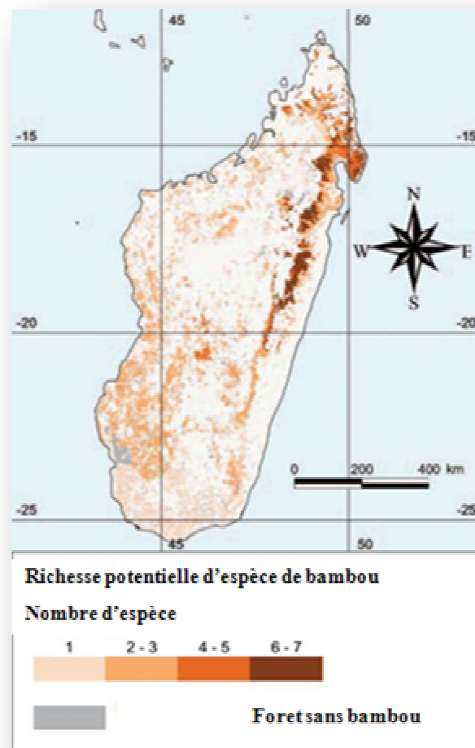
**Tableau II.1 : Distribution mondiale du bambou**

DISTRIBUTION MONDIALE DU BAMBOU			
LOCALISATION	SOUS-TRIBUS	GENRES	ESPECES
ASIE	6	44	Environ 600
AMERIQUE	4	21	Environ 400
MADAGASCAR	2	11	33
AFRIQUE	2	3	5
PACIFIQUE	2	2	4
AUSTRALIE	2	2	3
TOTAL	9	68	Environ 1000

## **Chapitre II : Les caractéristiques de l'espèce du bambou « *dendrocalamus asper* » et de l'espèce « *dendrocalamus giganteus* » de Madagascar**

---

A Madagascar, les bambous détiennent une place importante pour les communes rurales. Ils poussent, se multiplient naturellement et rapidement et assurent plusieurs fonctions à savoir : économique, sociale et écologique. En effet, le bambou peut être compacté, ou collé pour obtenir un matériau massif comme le bois. En plus les bambous sont exploitables dès leur troisième âge.



***Figure II.2 : Richesse potentielle du bambou à Madagascar***

### **II-2 LOCALISATION ET PRESENTATION DES DEUX ESPECES**

#### **II-2-1 LOCALISATION**

Les échantillons ont été prélevés dans la partie orientale de Madagascar, à Fenoarivo Atsinanana. Ce lieu de collecte a été choisi en raison de la présence en abondance de ces espèces du bambou.

#### **II-2-2 PRESENTATION DES DEUX ESPECES**

L'espèce « *Dendrocalamus giganteus* », connue sous le nom « *Volobe Mavo* », et l'espèce « *Dendrocalamus asper* », connue sous le nom « *Volobe Ambivahitra* ».

## ***Chapitre II : Les caractéristiques de l'espèce du bambou « dendrocalamus asper » et de l'espèce « dendrocalamus giganteus » de Madagascar***

---

### **a) Dendrocalamus giganteus**

Classification :

**Famille** : *POACEAE*

**Sous Famille** : *BAMBUSOIDEAE*

**Genre** : *Dendrocalamus*

**Espèce** : *Dendrocalamus Giganteus* ( Munro , 1968)

**Nom vernaculaire** : *Volobe Mavo*

Les traits les plus distinctifs de cette espèce sont d'un côté le grand diamètre des chaumes et d'autre côté la couleur externe du chaume qui est vert terne à vert bleuâtre, couvert de croutes blanches cireuses quand le pied est jeune.



**Dendrocalamus giganteus 1 an**



**Dendrocalamus giganteus 3 ans**

***Photo II.1 : Représentation de l'espèce dendrocalamus giganteus à l'âge 1an et 3ans***

### **b) Dendrocalamus asper**

**Famille** : *POACEAE*

**Sous Famille** : *BAMBUSOIDEAE*

**Genre** : *Dendrocalamus*

**Espèce** : *asper*

**Nom vernaculaire** : *Volobe Ambivahitra*

## ***Chapitre II : Les caractéristiques de l'espèce du bambou « dendrocalamus asper » et de l'espèce « dendrocalamus giganteus » de Madagascar***

---

Cette espèce est reconnue par ses grands diamètres des chaumes, ses grandes feuilles vertes, simples, caulinaires. Les chaumes sont couverts de poils quand ils sont jeunes. A partir de trois ans, où les chaumes atteignent la maturité, sa couleur devient plus claire et ils perdent ses poils.



***Photo II.2 : Représentation de l'espèce dendrocalamus asper***

### **II-3 IDENTIFICATION DES CHAUMES MATURES**

Les échantillons de chaume ont été collectés suivant trois critères qui sont : la maturité, la rectitude et l'accessibilité.

#### **II-3-1 LA MATURETE**

Les propriétés technologiques des bambous varient selon l'âge du chaume. Généralement, ces propriétés atteignent leur potentialité maximum à l'âge de 3ans, âge où commence le stade de maturation du chaume (Liese, 1985 ; Wakchaure et Kute, 2012)..



***Photo II.3 : Représentation des deux espèces dendrocalamus asper et giganteus à l'âge 1an et 3ans***

### **II-3-2 LA RECTITUDE**

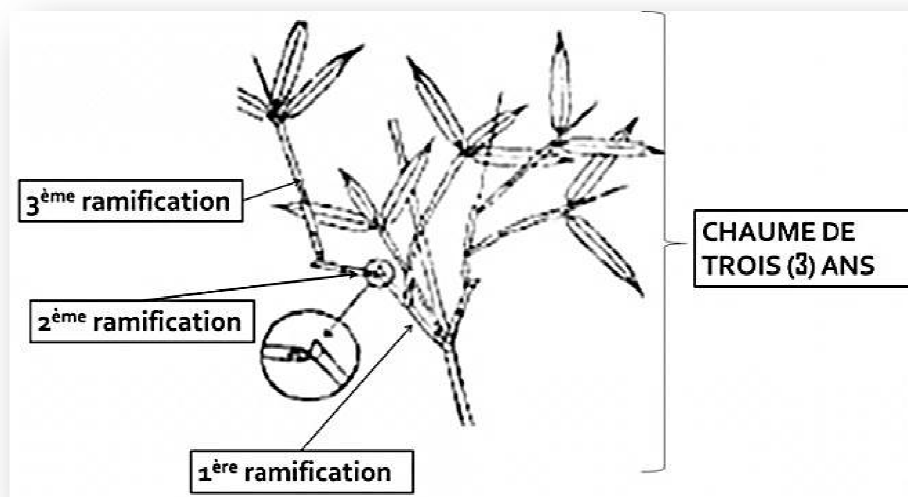
A part la maturité du chaume, sa rectitude suivant la hauteur a été également prise en compte afin de faciliter sa manipulation pour les prochaines étapes.

### **II-3-3 L'ACCESSIBILITE**

Vu que le prélèvement a été réalisé en milieu naturel, nombreux sont les obstacles qui limitent l'acquisition des chaumes. En effet, seuls les chaumes accessibles ont été collectés.

Pour obtenir des bambous de potentialité élevée, il a fallu trouver des chaumes possédant un âge supérieur à trois ans. C'est l'âge à partir duquel les bambous deviennent matures et ils atteignent les potentialités technologiques optimales. La détermination de l'âge a occasionné certaines difficultés : même si les chaumes appartiennent à une même touffe, ils ne sont pas obligatoirement de même âge.

Ainsi sur chaque touffe, il a fallu discerner les chaumes d'âge supérieur à trois ans des autres chaumes plus jeunes. Les bambous matures s'identifient par le nombre de ramifications qu'ils comportent. L'apparition de la première ramification signifie que le chaume est âgé d'un an. La deuxième ramification apparaît lorsque le chaume apparaît lorsque le chaume atteint l'âge de deux ans et ainsi de suite, comme nous indique la figure ci dessous.



**Figure II.3 : La connaissance de l'âge selon les ramifications**

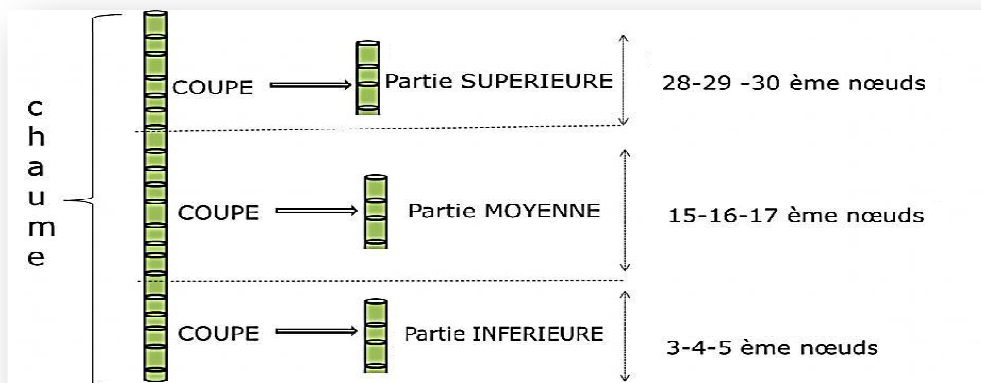
**SOURCE : Modifié de Wei-Chih Lin, 1970**



## **II-4 COUPE DES CHAUMES**

Après l'identification, l'abattage doit être trois chaumes au maximum par espèce pour faciliter le transport lors du déplacement. Ensuite contenant trois entrenœuds et provenant chacune de trois parties différentes :

- la partie inférieure, qui se trouve au troisième jusqu'au quatorzième nœud
- la partie moyenne, qui se trouve au quinzième jusqu'au vingt-septième nœud
- la partie supérieure qui se trouve à partir du vingt-huitième nœud

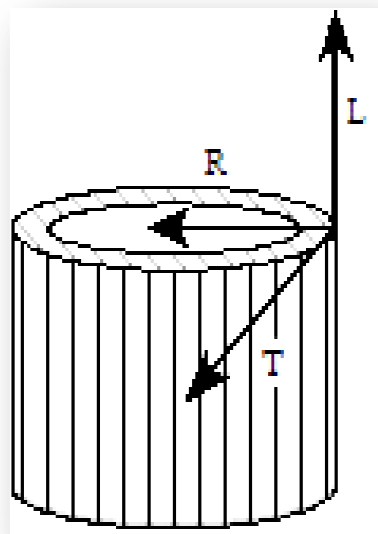


**Figure II.4** : Les différentes coupes de chaumes selon les trois parties : inférieure, moyenne, supérieure

## **II-5 ANISOTROPIE DU BAMBOU**

En ce qui concerne l'anisotropie du bambou, elle est marquée dans trois directions différentes :

- une direction axiale (L), parallèle au fil du bambou (axe de la croissance du chaume),
- une direction radiale (R), perpendiculaire à la première et orientée dans la section droite du cœur du chaume vers l'écorce,
- une direction tangentielle (T), également dans une section droite tangentielle à l'anneau au cœur du chaume ou perpendiculaire à la direction radiale.



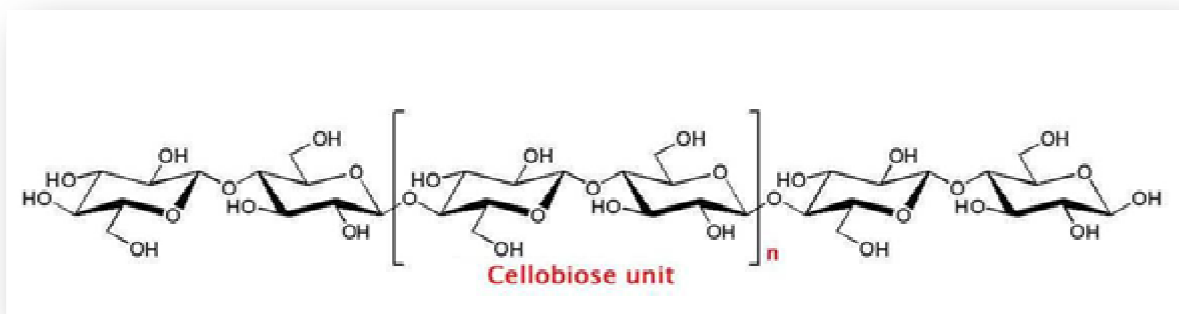
**Figure II.5 :** Anisotropie du bambou

## **II-6 PROPRIETES CHIMIQUES**

La composition chimique du bambou est similaire à celle du bois. Les principaux constituants des chaumes, pour 90% de leur masse, sont : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Une différence par rapport au bois est qu'il contient plus d'extraits alcalins, de cendres et de silices ainsi que des minéraux. Le bambou contient également de l'amidon, des protéines et des glucides. Ces derniers jouent un rôle important dans sa durabilité. La résistance du bambou contre les moisissures, les champignons et les insectes est fortement liée à sa composition chimique. Les propriétés chimiques du bambou varient avec son âge et sont en corrélation avec ses propriétés physiques et mécaniques.

### **a) La cellulose**

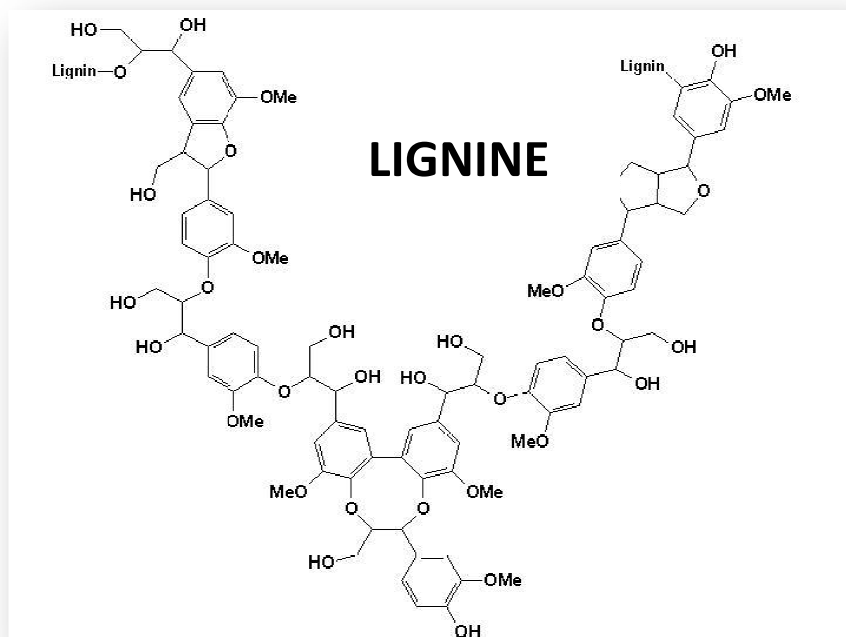
La cellulose est une macromolécule constituée par la polymérisation d'une molécule élémentaire appelée glucose. Elle a pour formule brute  $(C_6H_{10}O_5)_n$  et de composition analogue à l'amidon, mais de poids moléculaire beaucoup plus élevé avec un degré de polymérisation élevé compris entre 5 000 et 10 000. Un degré de polymérisation de 10 000 correspond à une chaîne d'une longueur de 5  $\mu m$ . C'est un constituant majoritaire du bambou et celui presque unique du bois, coton et des fibres textiles du type lin, chanvre, jute et ramie.



### **b) La lignine**

C'est un constituant majeur du bambou après la cellulose, un polymère complexe non linéaire et les motifs de base associés entre eux constituent un réseau qui s'interpénètre dans le réseau de la cellulose. La lignine donne au bambou de nouvelles propriétés et en particulier une grande hydrophobie.

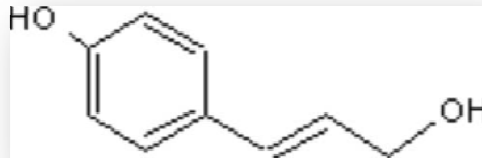
C'est un polymère thermoplastique qui soude les fibres entre elles et confère aux plantes leur rigidité. Il faudra soit la dissoudre à l'aide de produits chimiques, soit l'assouplir par montée de température, afin d'extraire du bambou des fibres cellulosiques souples et individualisées.



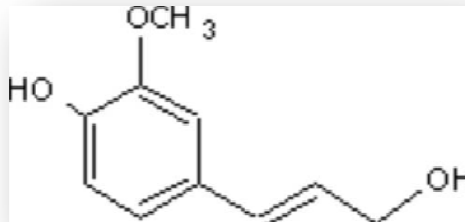
## Chapitre II : Les caractéristiques de l'espèce du bambou « *dendrocalamus asper* » et de l'espèce « *dendrocalamus giganteus* » de Madagascar

---

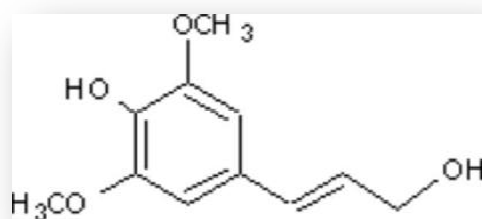
La lignine est issue de la polymérisation des alcools p-coumarylique, coniférylique et sinapylique, qui sont des monolignols, ou 4-hydroxyphénylpropanoïdes, dérivés d'un acide aminé, la phénylalanine. La polymérisation s'effectue par une radicalisation oxydative des monolignols suivie d'un couplage radicalaire combinatoire.



p-coumarylique



Alcool coniférylique



Alcool sinapylique

### c) Les hémicelluloses

Les hémicelluloses sont les polysaccharides majeurs de la paroi des cellules du bambou, combinée à la cellulose et partiellement à la lignine. Les hémicelluloses sont facilement dissoutes dans des nombreux réactifs comme la soude dont les chaînes ont un degré de polymérisation moyen de 50 ; elles sont plus courtes que celles de la cellulose et sont

souvent ramifiées. L'hémicellulose permet d'unir les filaments micellaires de cellulose pour former les fibrilles.

## **II-7 PROPRIETES PHYSIQUES**

### **II-7-1 TENEUR EN EAU**

La détermination du taux d'humidité permet de connaître la quantité d'eau emmagasinée dans le bambou à l'état sec. Elle est conforme à la norme NF B 51-004<sup>[Annexe I page H]</sup>, et se calcule par la formule suivante :

$$T_h = \frac{(m_0 - m_n)}{m_0} \times 100 \quad \text{II.1}$$

$m_0$  : masse à l'état initial [g]

$m_n$  : masse à  $T_n$  où nous avons une masse constante [g]

### **II-7-2 DENSITE A 12% D'HUMIDITE**

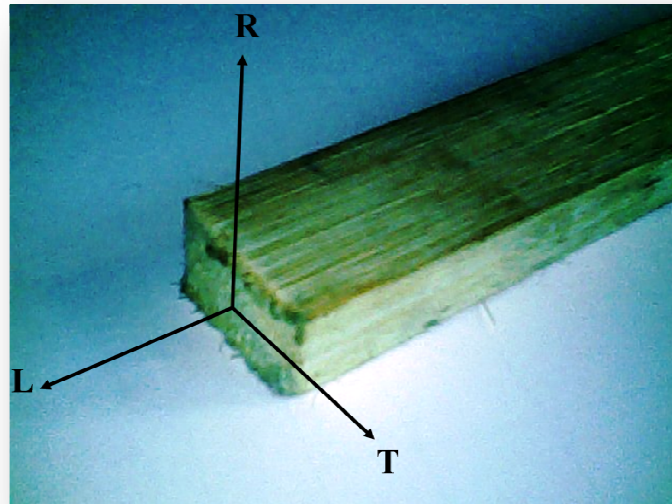
La masse volumique ou la densité à 12 % d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps à 12% d'humidité. Sa détermination est une caractéristique technologique de base, elle est la première à déterminer pour qualifier un matériau. En fait, elle est reliée plus ou moins étroitement, avec les principales propriétés physiques et mécaniques du matériau, ainsi qu'avec certains caractéristiques de mis en œuvre. Ce paramètre a également une grande influence sur le séchage (Ahmad, 2004). Un matériau à densité élevée est lourd et est constitué des cellules à parois épaisses et des vides cellulaires de faible diamètre. Ainsi, son séchage sera plus difficile que dans un matériau léger constitué de cellules à parois minces et à vides cellulaires de fort diamètre. Elle est conforme à la norme NF B 51-005<sup>[Annexe I page I]</sup>, sa valeur est donnée par :

$$D = \frac{\text{Masse à 12 \% d'humidité}}{\text{Volume à 12\% d'humidité}} \quad \text{II.2}$$

Avec  $V = \text{longueur} \times \text{largeur} \times \text{épaisseur}$  [mm<sup>3</sup>]

### **II-7-3 RETRAIT**

La rétractabilité est la propriété que possède les matériaux ligneux lorsque leur humidité varie .Le fait que le bambou soit anisotrope implique la mesure de cette rétractabilité suivant les trois directions L, R, T.



***Photo II.4 : Représentation du bambou avec ses trois directions : longitudinale, tangentielle, radiale***

La nécessité de connaître la rétractabilité repose sur le fait qu'elle aide à prendre des décisions quant aux utilisations des bambous. En effet la rétractabilité est un paramètre qui détermine sa stabilité dimensionnelle et qui conditionne les déformations des pièces pendant leur séchage et utilisation. Plus la rétractabilité est élevée, plus le matériau présente des déformations lorsque le taux d'humidité varie. La mesure du retrait est conforme à la norme NF B 51-006<sup>[Annexe I page J]</sup>, et se calcule par la formule suivante :

$$R\% = \frac{D_i - D_0}{D_i} \times 100 \quad \text{II.3}$$

Avec R% : le retrait suivant une direction [ % ]

$D_i$  : la dimension suivant une direction (L, R ou T) à l'état humide [ mm ]

$D_0$  : la dimension suivant une direction (L, R ou T) à l'état anhydre [ mm ]

**II-7- 4 TAUX D'ABSORPTION D'EAU** [Annexe I page K]

C'est le taux d'absorption d'eau des échantillons anhydres après l'hydratation .Il se calcule par

$$T_a = \frac{(m_{\text{anhydre}} - m_{\text{hydraté}})}{m_{\text{anhydre}}} \times 100 \quad \text{II.4}$$

$T_a$  : taux d'absorption [ % ]

$m_{\text{anhydre}}$  : masse des échantillons à l'état anhydre [g]

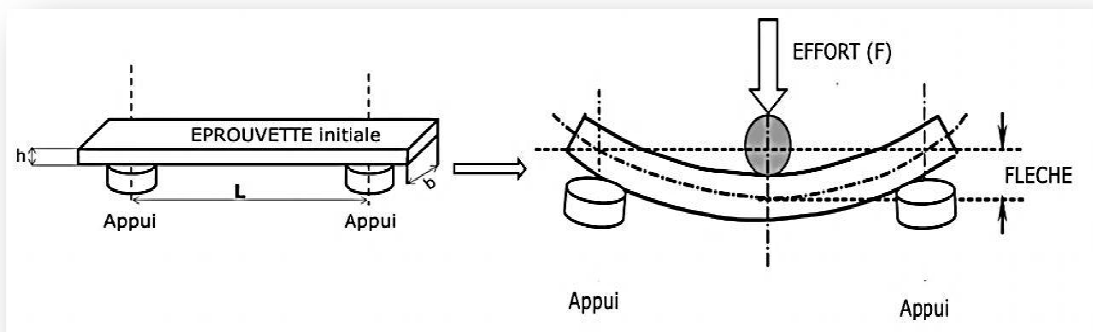
$m_{\text{hydraté}}$  : masse des échantillons à l'état hydraté [g]

**II-8 PROPRIETES MECANIQUES**

**II-8-1 ESSAI DE FLEXION SIMPLE OU ESSAIS DE FLEXION TROIS**

**POINTS**

La flexion provoque une distribution de contraintes présentant à la fois un gradient et une répartition de contraintes de traction et de compression de part et d'autre de la fibre neutre. L'essai flexion détermine l'aptitude à la déformation d'un matériau sur deux appuis avec une application de l'effort à mi-distance. Elle est conforme à la norme **NF B 51-008**[Annexe I page L]



**Figure II.6 : Essai de flexion simple**

## **Chapitre II : Les caractéristiques de l'espèce du bambou « dendrocalamus asper » et de l'espèce « dendrocalamus giganteus » de Madagascar**

---

On calcule la contrainte conventionnelle de rupture en flexion statique par la formule suivante:

$$\sigma = \frac{3 P \times L}{2 \times b \times h^2} \quad \text{II.5}$$

P : la charge totale appliquée à la rupture en flexion en Newton [N]

L : la distance en millimètre entre les axes des appuis cylindriques [mm]

b : la largeur mesurée en millimètre de l'éprouvette [mm]

h : la hauteur mesurée en millimètre de l'éprouvette [mm]

Cet essai permet de connaître :

- Le comportement mécanique du matériau
- Les propriétés du matériau
- Les valeurs des caractéristiques du matériau

### **II-8-2 RESISTANCE AU CHOC OU ESSAI DE RESILIENCE** [Annexe I page M -N]

L'essai de résilience a été élaboré pour prendre en compte ces phénomènes de rupture. Le moyen le plus classique pour caractériser la fragilisation du matériau sous l'action d'un choc est cet essai de résilience qui est un essai de flexion par choc sur une éprouvette entaillée qui mesure la résistance d'un matériau à la rupture brutale. Il est fréquemment dénommé : « essai de résilience CHARPY » ou même « essai CHARPY ». En effet, Georges CHARPY, ingénieur dans une usine sidérurgique, met au point en 1901 la machine (mouton CHARPY) qui permet de réaliser cet essai de résilience.

On détermine l'énergie absorbée dont on déduit la résilience. La résilience est l'énergie exprimée en [daNm/cm<sup>2</sup>], nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette.

$$K = \frac{W}{S} \quad \text{II.6}$$

K : facteur de résilience

W : énergie absorbée par la rupture W [daNm]

S : section au niveau de l'entaille [cm<sup>2</sup>]



# CHAPITRE III

## *Généralités sur les résines polyesters insaturés*

### III-1 LES PRINCIPAUX TYPES DE RESINES DE POLYESTERS INSATURES

- **Résines orthophtaliques** : ce sont des résines d'usage général basées sur un mélange d'anhydrides phtaliques (saturés) et d'anhydrides maléiques (insaturés) estérifié par du propylène glycol.

L'association d'anhydride saturé et d'anhydride insaturé permet de contrôler le degré de réticulation lors du durcissement. Par conséquent, la rigidité de la résine qui résulte de ce mélange peut être contrôlée par le rapport molaire maléique /phtalique qui peut varier de 2 pour 1 à 1 pour 2.

- **Les résines semi-rigides** : sont utilisées pour l'industrie nautique les piscines, les réservoirs d'eau, le bâtiment, etc.
- **Les résines rigides** : sont utilisées dans les préimprégnés et les vernis
- **Les résines isophtaliques** : les résines isophtaliques utilisent des acides isophtaliques. Il en résulte des résines plus chères que les résines orthophtaliques mais de qualité supérieure. Les résines isophtaliques ont une excellente propriété à l'humidité et des résistances mécaniques plus élevées.

Les résines isophtaliques ont une bonne résistance chimique et thermique que les résines orthophtaliques. Elles sont utilisées pour l'industrie nautique les piscines, dans le domaine de la décoration comme la reproduction des sculptures de bois.

- **Résine au méthyl méthacrylate** : dans ces résines, une partie du styrène est remplacée par du méthyl méthacrylate. Ces résines sont formulées pour être résistantes aux conditions climatiques et pour absorber les rayons UV (ultra-violet) sans jaunissement.

Par conséquent, ces résines sont utilisées comme gel coat et dans les applications externes. Notons que plus le taux de méthyl méthacrylate augmente plus la couleur du stratifié tend vers la transparence.

### III-2 CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

#### III-2-1 RESINES POLYMERISEES

Six facteurs principaux régissent leurs propriétés :

- ✓ structure des constituants : diacides et diols ;
- ✓ taux, mode et place de l'instauration ;
- ✓ masse moléculaire du polycondensat ;
- ✓ structure du ou des monomères ;
- ✓ proportions relatives polycondensat/monomères ;
- ✓ addition de charges, de renforts, de pigments et de colorants.

#### III-2-2 LES PROPRIETES GENERALES DES RESINES POLYESTERS

- ✓ la facilité de mise en œuvre des résines liquides ;
- ✓ leur copolymérisation rapide sans élimination de gaz ou de liquide ;
- ✓ leur stabilité dimensionnelle ;
- ✓ leurs propriétés isolantes ;
- ✓ leurs bonnes propriétés mécaniques ;
- ✓ leur facilité de coloration ou de modification.

#### III-2-3 PROPRIETES PHYSIQUES

- a) **Densité** (1,13 à 1,50) : sa mesure permet le calcul du retrait volumique.
- b) **Retrait** : il accompagne toute copolymérisation et est essentiellement lié au taux de doubles liaisons, de l'ordre de 6 à 10 %. C'est une des propriétés inévitables et gênantes des polyesters.
- c) **Indice de réfraction** (1,54 à 1,57) : il constitue une caractéristique importante qui régira l'aspect dans certaines applications des résines renforcées par des fibres de verre ; il est fonction des matières premières.

- d) **Dureté** : elle est fonction de la température de mesure et des matières premières. On l'exprime dans des échelles conventionnelles : dureté Barcol : 35 à 40 ou dureté Persoz : 230 à 250. Elle rend compte du degré de polymérisation atteint.

### III-2-4 PROPRIETES MECANIQUES

- a) **Résistance en flexion** : selon le type de résine, elle peut varier de 40 à 170 [N/cm<sup>2</sup>].

La valeur maximale de la résistance correspond à un taux d'instauration particulier à chaque formule. Selon la formule, ce taux varie de 50 à 70 %.

Pour un taux d'instauration de 60 %, la résistance en flexion des polyesters au diéthylèneglycol est supérieure à celle des polyesters au propylène glycol.

- b) **Résistance en traction** : la résistance en traction peut varier de 7 à 70 [N/cm<sup>2</sup>] selon le type de résine. La valeur maximale de la résistance en traction des polyesters au diéthylèneglycol est supérieure à celle des polyesters au propylèneglycol.

- c) **Allongement à la rupture** : les taux élevés d'instauration entraînent un faible allongement à la rupture, de 1 à 3 % pour la plupart des résines, celui des résines flexibles atteignant 10 à 15 %.

- d) **Module d'Young** : selon les types, il varie de 1 400 à 6 000 [N/cm<sup>2</sup>]. C'est une caractéristique très intéressante, non seulement pour évaluer l'état de copolymérisation d'une résine connue, mais également pour suivre l'évolution du comportement d'une résine au cours d'un vieillissement naturel ou accéléré.

- e) **Résistance en compression** : les résines polyesters ont un excellent comportement en compression. La résistance, selon les types, se situe entre 800 et 2 500 [N/cm<sup>2</sup>]. Ces valeurs ne sont valables toutefois charge rapide.

- f) **Résistance au choc** : déterminée au mouton-pendule Charpy, varie selon les types entre 60 et 220 [J/cm<sup>2</sup>].

### III-2-5 TENUE CHIMIQUE

La tenue chimique des polyesters insaturés aux divers agents chimiques est liée à leur structure qui présente deux points faibles :

- ✓ les fonctions ester peuvent être hydrolysées en molécules de petites tailles et passent facilement en solution ;
- ✓ les ponts polystyrènes sont facilement détruits par les oxydants et les solvants; le réseau tridimensionnel est alors dégradé et, par suite, les propriétés mécaniques.

Ces réactions d'hydrolyse sont fortement tributaires de la température et du taux d'humidité du milieu agressif.

- ✓ Tenue aux alcalis : faible, il y a saponification.
- ✓ Tenue aux acides : bonne dans les solutions diluées, mauvaise dans les acides oxydants concentrés.
- ✓ Tenue aux acides réducteurs : faible.
- ✓ Tenue aux sels : bonne.
- ✓ Tenue aux alcools : bonne (surtout pour les résines isophtaliques).
- ✓ Tenue aux cétones : mauvaise.
- ✓ Tenue aux amines : mauvaise.
- ✓ Tenue aux hydrocarbures : bonne à froid, mauvaise à chaud.
- ✓ Tenue aux solvants halogénés : mauvaise.
- ✓ Tenue à  $\text{SO}_2$  : bonne.
- ✓ Tenue à  $\text{NH}_3$  : mauvaise.

Les tenues chimiques précédentes ne sont valables que pour les résines classiques. Il existe une gamme de résines polyesters dites à haute résistance chimique et caractérisées par :

- ✓ une masse moléculaire élevée ;
- ✓ un faible pourcentage de fonctions esters (glycol lourd) ;
- ✓ un taux de réticulation élevé (teneur en doubles liaisons élevée) ;
- ✓ une structure à tendance cristalline.

Ces résines obtenues à partir de glycols lourds ou ramifiés, à configuration symétrique :

- ✓ bisphénol A hydrogéné ;
- ✓ néopentylglycol ;
- ✓ triméthylpentanediol, et d'un acide éthylénique à forte réactivité :

Les acides isophtalique, fumarique ou itaconique et le phtalate de diallyle (résistance aux solvants), sont fortement condensés pour diminuer la proportion de groupements terminaux.

### **III-2-6 TENUE AU FEU**

Les résines de polyesters insaturés standards (fumarophtalate de propylèneglycol dissous dans le styrène) présentent une mauvaise résistance à l'inflammation.

Constituées essentiellement de carbone et d'hydrogène, elles sont combustibles. L'étude de la pyrolyse d'une résine polyester classique montre qu'il y a dépolymérisation entre 200 et 400 °C et formation de styrène monomère.

Au contact d'une flamme, ce dernier s'enflamme et transmet le feu au matériau. Différentes voies sont possibles pour obtenir des stratifiés polyesters à comportement au feu amélioré :

- ✓ modification chimique de la résine
- ✓ incorporation de charges appropriées
- ✓ combinaison des deux voies précédentes

### **III-3 COPOLYMERISATION DES RESINES POLYESTERS INSATURES**

#### **a) Les catalyseurs**

Ils sont extrêmement nombreux. Ils se caractérisent par :

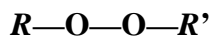
- Leur classe chimique (peroxydes de cétones, hydroperoxydes,...)
- Leur méthode de préparation (impuretés), (différentes marques commerciales)
- Leur teneur en oxygène actif (1,2 à 17%)
- Leur teneur en peroxyde (20 à 97%)
- Leur température critique de décomposition, qui détermine la température de travail (20 à 30% plus élevée)
- Leur activité, durée de vie, transformation de moitié (temps) dans des conditions bien déterminées,
- Leur présentation (pâtes, poudres, liquides)
- Leur flegmatisant (nature et taux)
- Leur stabilisant

### Chapitre III : Généralités sur les résines polyesters insaturés

---

Les catalyseurs ont pour rôle d'amener la macromolécule de polyester à niveau énergétique tel que la réaction de copolymérisation devient possible dans les conditions de transformation choisies.

Ces catalyseurs sont des peroxydes organiques de formule :



Ils peuvent être considérés comme des dérivés du peroxyde d'hydrogène



Dans lequel un ou deux atomes d'hydrogène sont remplacés par de chaînes hydrocarbonées, hétérocycliques, ou des radicaux acides. Par décomposition d'ordre chimique ou physique, ces initiateurs donnent naissance à deux fragments moléculaires de la forme : Ces radicaux libres, en général, n'ont pas d'existence stable ; ils sont actifs puisque possédant un électron libre.

Le radical  $R-O^*$ , cherchant à se stabiliser, est attiré par l'orbitale  $\pi$  la plus proche du polymère ou du styrène, dont il casse la deuxième liaison pour former, avec l'électron de l'orbitale  $\pi$  résultante, une simple liaison stable ; l'électron  $\pi$  restant, issu de cette rupture, va chercher lui aussi à se stabiliser par rupture d'une autre double liaison.

Ainsi, le radical  $R-O^*$  déclenche une réaction en chaîne. Cette polymérisation est appelée réticulation et conduit à un corps thermodurcissable. Les principales classes de peroxydes utilisés sont :

Des peroxydes dérivés de cétones, utilisés généralement à basse température en combinaison avec des sels de cobalt accélérateurs :

- ❖ peroxyde de méthyléthylcétone,
- ❖ peroxyde d'acétylacétone,
- ❖ peroxyde de méthylisobutylcétone,
- ❖ peroxyde de cyclohexanone

### b) Les accélérateurs

Substance qui, utilisée en faible proportion, augmente la vitesse de la réaction d'un système chimique. L'adjonction d'accélérateur a, en général, pour but d'accroître la vitesse de décomposition du catalyseur mélangé à la résine de base. Il en résulte un accroissement important du système de résine.

L'accélérateur est utilisé en fonction de sa compatibilité avec le catalyseur.

Les plus courants sont :

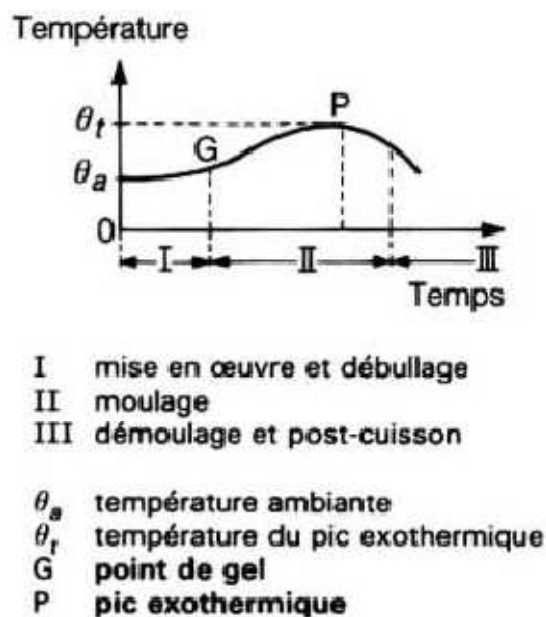
- les **sels de cobalt** divalents : napténate ou octoate de cobalt ;
- les **amines tertiaires aromatiques** : dimétylaniline (DMA), diméthylparatoluidine (DMPT) et diétylaniline (DEA)

### III-3-1 COPOLYMERISATION A FROID

#### III-3-1-1 GENERALITES

Une résine de polyester insaturé contenant un monomère insaturé (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur. Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible.

La réaction est exothermique; la température de la résine augmente progressivement depuis le gel jusqu'à un maximum pour redescendre ensuite lentement à la température ambiante.



**Figure III.1 :** Réaction de polymérisation à froid, courbe de montée en Température



Le durcissement sera d'autant plus rapide ou, si l'on préfère, le temps nécessaire dans le moule sera d'autant plus court que la courbe de température en fonction du temps se rapprochera davantage de la verticale.

La réaction de durcissement dépend de la réactivité de la résine, de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.), de la nature et du dosage du système catalytique.

### **III-3-1-2 DEFINITIONS**

#### **a) Durée de conservation**

C'est le temps de conservation à la température ambiante des mélanges résine-catalyseur. Il est de première importance pour les transformateurs faisant appel à des machines à projeter, alimentées d'un côté par la résine catalysée et de l'autre par la résine accélérée, qui se mélangent en proportion égale à la sortie de deux buses.

Si la durée de conservation des mélanges résine – accélérateur est suffisamment longue, il en va autrement des mélanges résine-catalyseur, dont la durée de conservation est toujours limitée. Passé ce temps, l'augmentation importante de la viscosité de la résine empêche son écoulement à travers les organes de la machine.

Cette durée de conservation dépend, pour une même résine, de la nature et de la quantité du catalyseur incorporé.

#### **b) Temps de gel ou de gélification**

C'est le temps qui s'écoule entre le moment où l'on ajoute le dernier des deux adjuvants (catalyseur ou accélérateur) à la résine et le moment où celle-ci commence à gélifier et ne coule plus.

Sa détermination est très importante pour les transformateurs travaillant par stratification manuelle puisqu'il équivaut au temps maximal de façonnage de la résine.

Les transformateurs utilisant une machine à projeter doivent en tenir compte pour réaliser une imprégnation et un débullage corrects, ainsi que pour éviter une accumulation de résine au fond du moule.

Le temps de gélification dépend de la nature et des quantités de catalyseur et d'accélérateur incorporées.

#### **c) Temps de polymérisation**

C'est le temps qui s'écoule après le mélange accélérateur – catalyseur jusqu'au pic exothermique.

### d) Cadence

Elle est déterminée par le temps d'immobilisation du moule, c'est-à-dire le temps minimal au bout duquel on peut retirer la pièce du moule sans risque de déformation. Ce temps dépend de la résine et des quantités de catalyseur et d'accélérateur incorporées.

Pour augmenter la cadence, on doit choisir le système catalytique conduisant à l'évolution la plus rapide de la dureté de la pièce, ou, en d'autres termes, le système catalytique conduisant à une courbe température-temps se rapprochant le plus possible de la verticale.

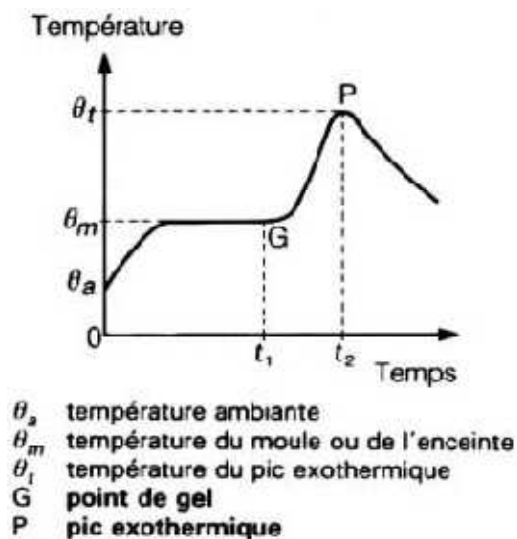
### III-3-2 COPOLYMERISATION A CHAUD

#### III-3-2-1 GENERALITES

De même que pour le durcissement à froid, la résine polyester additionnée d'un catalyseur du type peroxyde passe successivement de l'état de gel à l'état solide. La viscosité de la résine commence par chuter avant la gélification à cause de l'élévation de température.

Le principe du moulage consiste à alimenter un moule chauffé avec la résine froide. La température de la résine augmente progressivement depuis la température du moule ou de l'enceinte jusqu'à un maximum (pic exothermique) en raison du caractère exothermique de la réaction de durcissement.

Comparativement au durcissement à froid, le point de gel et le pic exothermique sont généralement atteints plus rapidement pendant le durcissement à chaud et le pic est également plus élevé, d'où la possibilité d'avoir des cadences plus rapides par le procédé à chaud.



**Figure III.2 :** Réaction de polymérisation à chaud, courbe de montée en Température

La réaction de durcissement à chaud dépend des mêmes paramètres qu'à froid : réactivité de la résine, nature et dosage du catalyseur, forme de l'objet fabriqué, en particulier épaisseur, et, bien entendu, elle dépend de la température du moule ou de l'enceinte à laquelle la résine est portée.

### **III-3-2-2 DEFINITIONS**

#### **a) Durée de conservation**

La durée de conservation des mélanges résines - peroxydes est de plusieurs heures avec la plupart des catalyseurs pour procédés à haute température.

Lorsque la conservation doit être longue, on utilise des peroxydes à haute température critique en association avec un inhibiteur (par exemple BQ) ; c'est le cas des préimprégnés et des compositions.

Il est conseillé de stocker les mélanges à basse température (< 20 °C).

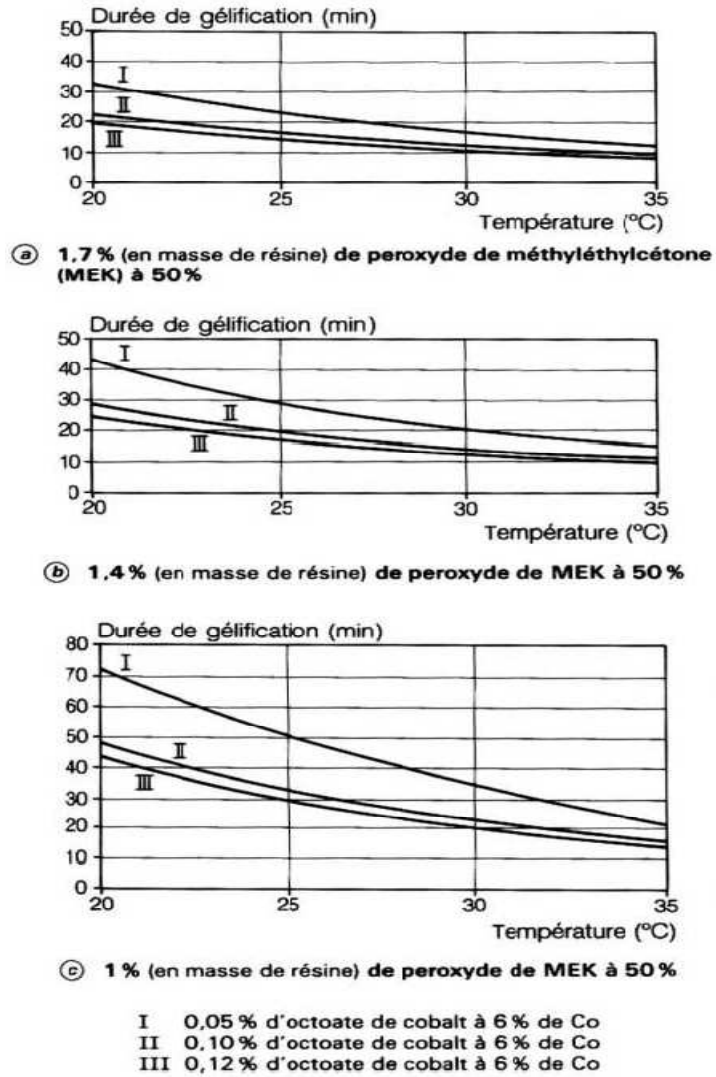
#### **b) Temps de gel ou de gélification**

Il est réglé, pour des quantités données de catalyseur et d'accélérateur, en fonction de la température et des dimensions du moule, la gélification ne devant intervenir que lorsqu'un remplissage complet du moule est réalisé.

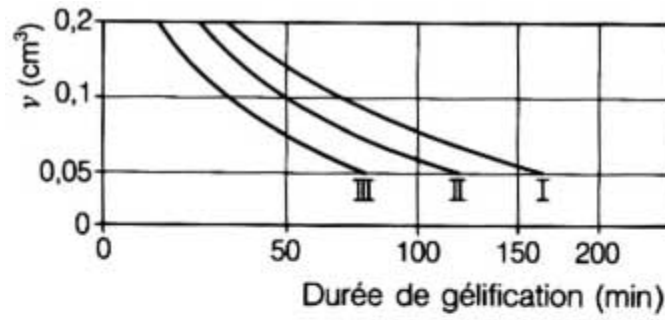
#### **c) Cadence**

Comme pour le durcissement à froid, la cadence est augmentée par l'emploi d'un catalyseur conduisant au pic le plus élevé atteint dans un laps de temps le plus court possible.

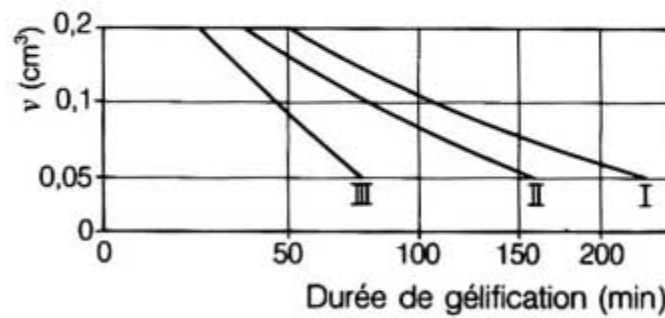
À noter cependant que, à partir d'une certaine température de moulage, les différences entre pics s'amenuisent et que c'est alors le temps écoulé pour obtenir le pic qui doit être pris en considération.



**Figure III.3 :** Durée de gélification pour une résine isophtalique pour moulage au contact en fonction de la température pour différentes proportions de peroxyde de MEK



(a) à 25 °C



(b) à 20 °C

v volume de diméthylaniline dans 100 g de résine

I 1,5 % de peroxyde de benzoyle à 50 %

II 2 % de peroxyde de benzoyle à 50 %

III 3 % de peroxyde de benzoyle à 50 %

**Figure III.4 :** Durée de gélification pour une résine isophthalique pour moulage au contact à 20°C et à 25°C, pour différentes proportions de peroxyde de benzoyle à 50% et de diméthylaniline

### III- 4 POSSIBILITES DE LA RESINE POLYESTER INSATURE

**Tableau IV.1 : Principaux avantages et limites d'utilisation**

PRINCIPAUX AVANTAGES	LIMITES D'UTILISATION
<p><b>BAS PRIX</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Liquide très faible viscosité, donc fortement chargeable,</li> <li>■ Mise en œuvre facile,</li> <li>■ 100% polymérisable</li> <li>■ Réaction de polymérisation : moulage sur toutes les températures et pressions</li> <li>■ Possibilité de moulage à faible pression et même sans pression : simplifications des moules qui n'ont pas besoin de posséder une résistance mécanique élevée et peuvent se faire dans des matériaux peu coûteux, et facile à usiner (bois, plâtres stratifiés, etc.....)</li> <li>■ Pas de dégazage</li> <li>■ Suppression du chauffage (fours, étuves) avec promotorisées</li> </ul> <p><b>POLYVALENCE</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Toutes les méthodes de transformation des matériaux composites</li> <li>■ De l'artisanat aux systèmes très automatisés</li> <li>■ Toutes les gammes de températures et de pressions</li> </ul> <p><b>PRESENTATION</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Faible couleur</li> <li>■ Transparence possible avec le renfort</li> <li>■ Formes esthétique possible</li> </ul> <p><b>PROPRIETES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Assez bonne caractéristiques mécaniques, électriques, résistance à la chaleur de courte durée et résistance chimique aux acides faibles .Bonne rigidité et stabilité dimensionnelle,</li> <li>■ Isolant thermique et électrique</li> </ul>	<p><b>MANIPULATION – HYGIENE - SECURITE</b></p> <p><b>Dosages délicat, danger du mélange direct catalyseurs+accélérateurs, odeur du styrène</b></p> <p><u>Remède :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Résines pré-accélérées ou promotorisées</li> <li>■ Apparition sur le marché de nouvelles résines à très faible dégagement de styrène</li> <li>■ Utilisation des monocomposants</li> </ul> <p><b>EXOTHERMIE ELEVEE : Microfissure néfaste</b></p> <p><u>Remède :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Changement de système de catalyse augmentant l'amplitude gel-pic</li> <li>■ Modification par monomère à faible exothermie (<math>\alpha</math>Methylstyrène)</li> </ul> <p><b>ANTICORROSION : Mauvaise tenue aux acides forts, aux alcalis, aux solvants,</b></p> <p><u>Remède :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Résine spéciale anticorrosion</li> </ul> <p><b>INFLAMMABILITE : Mauvaise tenue au feu</b></p> <p><u>Remède</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Résine spécialement inflammable mais alors gaz toxiques</li> <li>■ Résine fortement chargée avec de l'hydrate d'alumine : diminution de fumée et de gaz</li> </ul> <p><b>RESISTANCE A LA FATIGUE : Assez faible</b></p> <p>Mauvaise adhérence de la matrice sur le renfort, fort coefficient de dilatation, faible pourcentage d'allongement à la rupture pour suivre la variation des fibres.</p> <p><u>Remède</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Plastification par résine flexible,</li> </ul> <p><b>RESISTANCE A LA TEMPERATURE :</b> Indice de température des stratifiés entre 100°C et 150 °C</p>

# PARTIE II

## *Etudes experimentales*

# CHAPITRE IV

## *Résultats et Interprétations*



Les bambous sont confectionnés en éprouvettes <sup>[Annexe I page A-B-C-D-E-F-G]</sup> avant d'être étudiés physiquement et mécaniquement. Dans notre travail, nous allons étudier les propriétés physiques et mécaniques des deux espèces de bambou : *dendrocalamus asper* et *dendrocalamus giganteus* suivant les deux paramètres :

- Les trois parties du bambou ou suivant la hauteur des chaumes.
- L'âge

Dans cette première partie, nous allons étudier les propriétés physiques : humidité, densité, retrait dimensionnel, taux d'absorption d'eau, et pour les propriétés mécanique : la résistance à la flexion et la résistance au choc suivant la hauteur des chaumes.

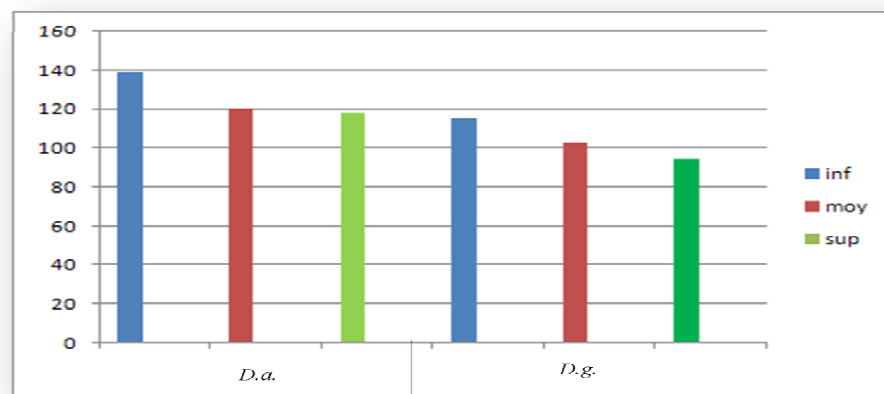
### IV-1 PARAMETRE SUIVANT LES TROIS PARTIES DU BAMBOU

#### IV-1-1 TAUX D'HUMIDITE

Comme le bois, le bambou est un matériau hygroscopique, il est susceptible de perdre ou de reprendre de l'humidité en fonction de la température et surtout de l'humidité relative de l'air ambiant. Le tableau ci-dessous nous montre les valeurs du taux d'humidité des espèces *dendrocalamus asper* et *dendrocalamus giganteus* suivant la hauteur.

**Tableau IV.1 : Variation du taux d'humidité des deux espèces suivant la hauteur des chaumes**

	Dendrocalamus Asper			Dendrocalamus Giganteus		
	Partie Inférieure	Partie Moyenne	Partie Supérieure	Partie Inférieure	Partie Moyenne	Partie Supérieure
Taux d'humidité [%]	139,47	120,25	118,3	115,74	102,84	94,12



**Figure IV.1 : Histogramme montrant la variation du taux d'humidité des deux espèces suivant la hauteur des chaumes**

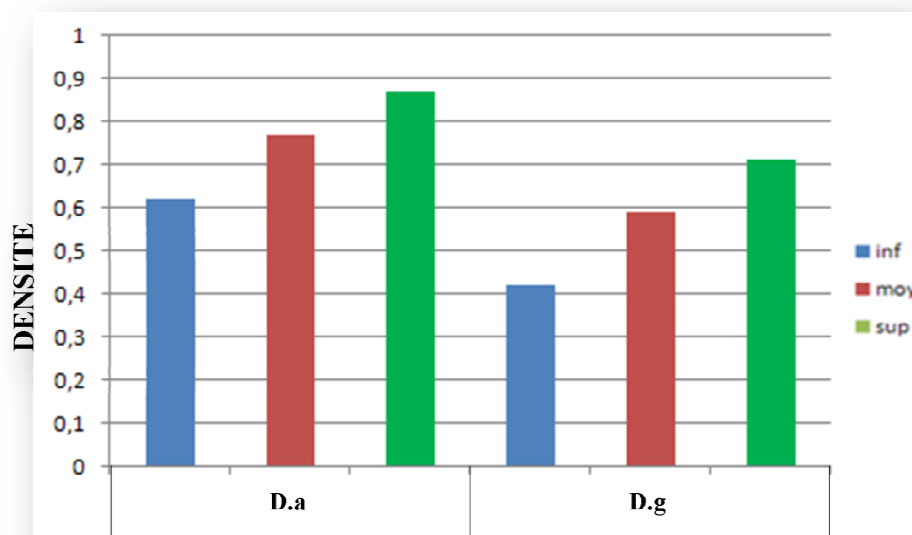
L'histogramme nous montre que pour les deux espèces, le taux d'humidité diminue suivant la hauteur. Dans notre résultat, le *dendrocalamus asper* contient beaucoup d'eau avec une teneur 139,47 % dans la partie inférieure et diminue jusqu'à 118,3 % dans la partie supérieure. Pour le *dendrocalamus giganteus*, la partie inférieure a un taux d'humidité 115,74 % et diminue jusqu'à 94,12 % pour la partie supérieure. En effet, les parties inférieures et moyennes du chaume sont plus proches des racines et les rhizomes qui fournissent des aliments et de l'énergie pour la plante entière. L'humidité et la nutrition suivent une trajectoire vers le haut, le long des cellules du chaume. En conséquence, il y a une plus grande teneur en eau dans les cellules et les fibres de ces locations.

### IV-1-2 DENSITE A 12% D'HUMIDITE

La densité est un facteur important pour la caractérisation physique du bambou. Le tableau ci-dessous nous montre les valeurs de la densité des espèces *dendrocalamus asper* et *dendrocalamus giganteus* suivant la hauteur.

**Tableau IV.2 : Variation de la densité des deux espèces suivant la hauteur des chaumes**

	Dendrocalamus Asper			Dendrocalamus Giganteus		
	Partie Inférieure	Partie Moyenne	Partie Supérieure	Partie Inférieure	Partie Moyenne	Partie Supérieure
Densité	0,62	0,78	0,88	0,42	0,58	0,72



**Figure IV.2 : Histogramme montrant la variation de la densité des deux espèces suivant la hauteur des chaumes**

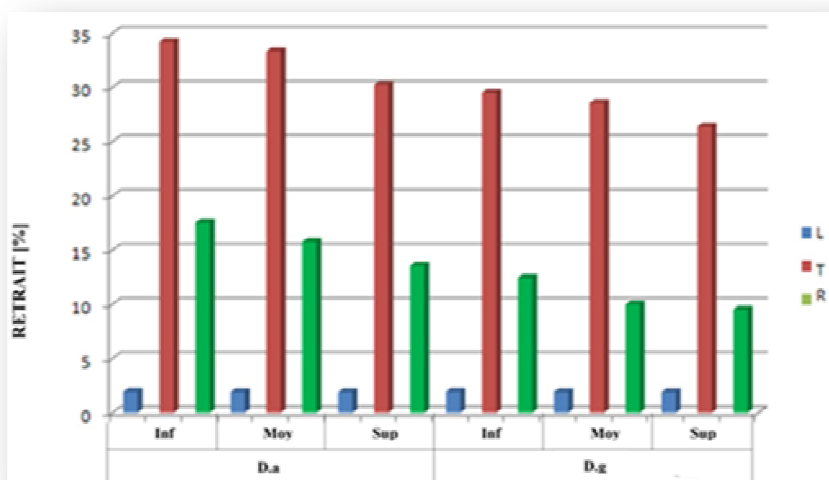
Cet histogramme montre que la densité augmente suivant la hauteur des chaumes. En effet, cette augmentation entre les divers entrenœuds provient du processus de maturation ou lignification, qui commence de la base à la partie supérieure du chaume. De plus, c'est l'augmentation du nombre des cellules sclerenchymateuses et des cellules conductrices implique aussi à l'augmentation de la densité. Dans notre travail la moyenne de la densité de *dendrocalamus asper* est de 0,76 et pour le *dendrocalamus giganteus* est de 0,57. Donc, le *dendrocalamus asper* peut être classé dans le type de « bois lourd » et le *dendrocalamus giganteus* dans le type de bois « mi-lourd ».

**IV-1-3 RETRAIT**

Le changement d'humidité du bambou provoque des variations de dimensions. Ces variations se produisent dans les trois directions principales : longitudinale, tangentielle et radiale. Le tableau ci-dessous nous montre les valeurs des retraits dimensionnels des espèces *dendrocalamus asper* et *dendrocalamus giganteus* suivant la hauteur.

**Tableau IV.3 : Variation des retraits dimensionnels des deux espèces suivant la hauteur des chaumes**

Partie	Dendrocalamus Asper									Dendrocalamus Giganteus								
	Partie Inférieure			Partie Moyenne			Partie Supérieure			Partie Inférieure			Partie Moyenne			Partie Supérieure		
Direction	L	T	R	L	T	R	L	T	R	L	T	R	L	T	R	L	T	R
Variation [%]	1,95	34,22	17,55	1,92	33,33	15,78	1,91	30,24	13,56	1,95	29,53	12,45	1,92	28,57	10	1,91	26,42	9,53



**Figure IV.3: Histogramme montrant la variation des retraits dimensionnels des deux espèces suivant la hauteur des chaumes**

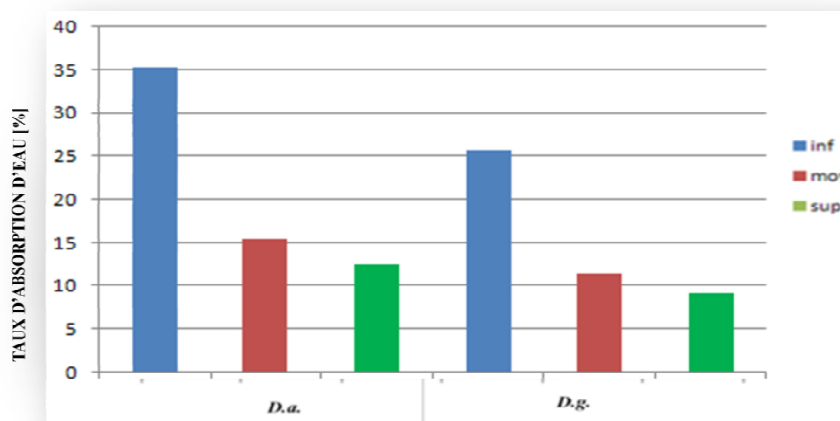
Cet histogramme nous montre que les rétractabilités dimensionnelles diminuent avec la hauteur des chaumes pour les deux espèces. Cette diminution s’explique par leurs formes et leurs contenus. De la base au sommet, le diamètre et l’épaisseur d’un chaume diminuent, c’est-à-dire que le volume occupé par l’eau est plus élevé dans leur partie inférieure et diminue en hauteur où les diamètres des chaumes deviennent de plus en plus étroits. Dans notre résultat, le retrait longitudinal est généralement inférieur pour les deux espèces car quand le processus de séchage est lancé, les échantillons tendent à s’aplatir mais en même temps il peut s’allonger dans le sens longitudinal. Le retrait radial est toujours moins marqué que celui du tangentiel. En effet, ces bambous ne présentent pas de cellules dans la direction radiale, contrairement au bois qui ont des rayons de transport de nutriments. Les cellules sont verticales le long de la chaume et transversales à travers leurs parois.

**IV-1-4 TAUX D’ABSORPTION**

Les valeurs du taux d’absorption d’eau à l’état anhydre suivant la hauteur sont présentées sur le tableau ci-dessous

**Tableau IV.4 : Variation du taux d’absorption des deux espèces suivant la hauteur des chaumes.**

	Dendrocalamus Asper			Dendrocalamus Giganteus		
Partie	Partie Inférieure	Partie Moyenne	Partie Supérieure	Partie Inférieure	Partie Moyenne	Partie Supérieure
Taux d’absorption [%]	35,14	15,78	13,46	26,55	11,64	8,32



**Figure IV.4: Histogramme montrant la variation du taux d’absorption des deux espèces suivant la hauteur des chaumes**

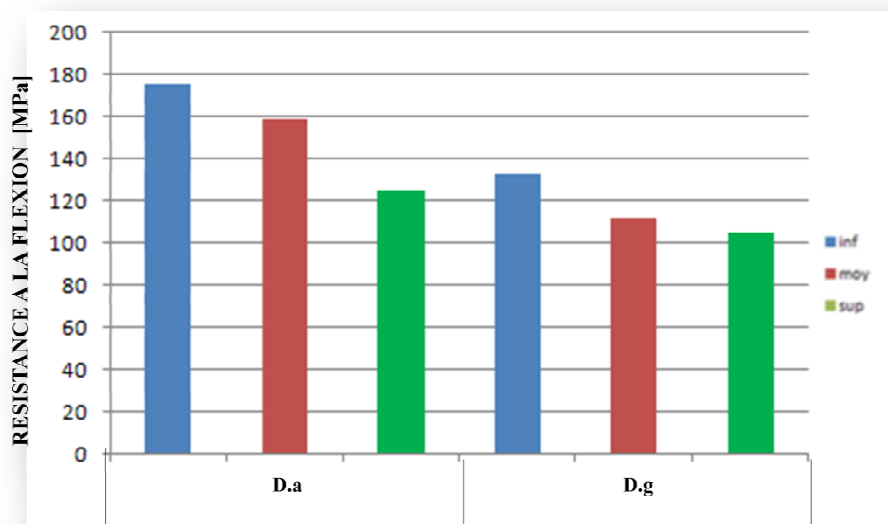
Cet histogramme nous montre que comme le taux d’humidité, le taux d’absorption diminue suivant la hauteur. Dans la partie inférieure du *dendrocalamus asper* , le taux d’absorption est de 35,14[%] et dans la partie supérieure , il est de 13,46[%] et pour le *dendrocalamus giganteus* , 26,55 [%] dans la partie inférieure et 8,32 [%] dans la partie supérieure. En effet, à l’état anhydre les fibres se rétrécissent et il existe des espaces vides, ce qui facilite l’entrée d’eau .Et puisque dans la partie inférieure, le taux d’humidité était trop élevé, donc l’absorption aussi est élevée et ce taux diminue quand la hauteur monte.

**IV-1-5 RESISTANCE A LA FLEXION**

La résistance à la flexion des échantillons en bambou suivant la hauteur est présentée sur le tableau ci-dessous.

**Tableau IV.5 : Variation de la résistance à la flexion des deux espèces suivant la hauteur des chaumes**

Partie	Dendrocalamus Asper			Dendrocalamus Giganteus		
	Partie Inférieure	Partie Moyenne	Partie Supérieure	Partie Inférieure	Partie Moyenne	Partie Supérieure
Resistance à la flexion [MPa]	178,81	159,64	123 ,46	137,42	118,68	105,41



**Figure IV.5: Histogramme montrant la variation de la résistance à la flexion des deux espèces suivant la hauteur des chaumes**

Cet histogramme nous montre que la résistance à la flexion diminue aussi suivant la hauteur. La résistance optimale à la flexion du *dendrocalamus asper* est de 178,81 [MPa], et

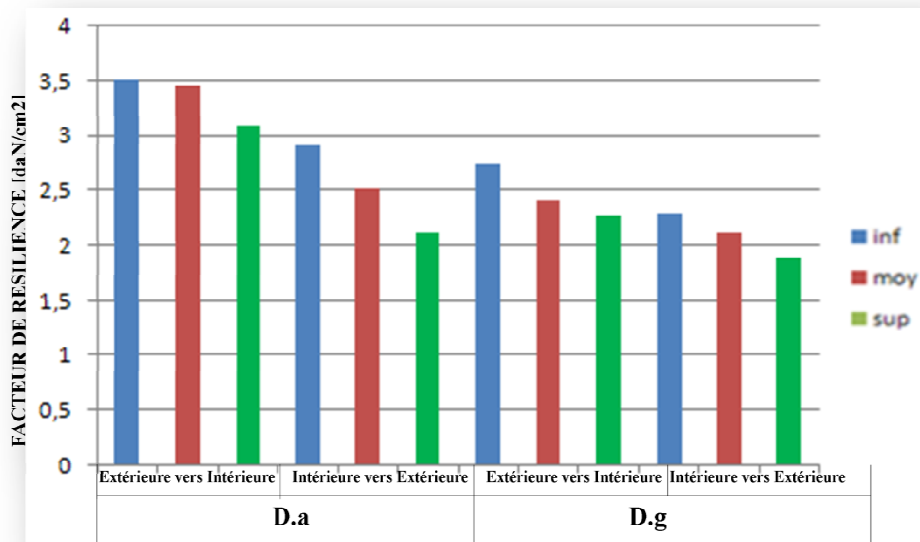
pour le *dendrocalamus giganteus* est de 137,42 [MPa] dans la partie inférieure. En effet, les fibres qui se trouvent dans la partie inférieure sont très résistantes à la rupture car c'est dans cette partie se trouve les maximums des constituants des bambous qui leur fournissent de l'énergie.

**IV-1-6 RESISTANCE AU CHOC**

Les valeurs du facteur de résilience des échantillons en bambou de la couche extérieure à l'intérieure et de l'intérieure à l'extérieure sont présentées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau IV.6 : Variation de la résistance au choc des deux espèces, de la couche extérieure vers l'intérieure et de la couche intérieure vers l'extérieure, suivant la hauteur des chaumes**

Couche	Dendrocalamus Asper						Dendrocalamus Giganteus					
	Extérieure vers intérieure			Intérieure vers Extérieure			Extérieure vers intérieure			Intérieure vers Extérieure		
Partie	INF	MOY	SUP	INF	MOY	SUP	INF	MOY	SUP	INF	MOY	SUP
Facteur de résilience [daN/cm <sup>2</sup> ]	3,5	3,4	3,2	2,8	2,5	2,2	2,7	2,4	2,3	2,3	2,2	1,8



**Figure V.6: Histogramme montrant la variation de la résistance au choc des deux espèces, de la couche extérieure vers l'intérieure et de la couche intérieure vers l'extérieure, suivant la hauteur des chaumes**

Cet histogramme nous montre que la résistance au choc de la couche extérieure vers la couche intérieure est plus élevée que la résistance de la couche intérieure vers l'extérieure pour les deux espèces. En effet, la couche extérieure est près de l'écorce qui est une couche très dure donc cette partie résiste bien.

Cette première partie nous a permis de connaître que suivant la hauteur des chaumes des bambous, le taux d'humidité diminue, au contraire la densité augmente. Pour le retrait, il est marqué par la direction tangentielle. Le taux d'absorption diminue aussi suivant la hauteur. Sur les propriétés mécaniques, la résistance en flexion diminue suivant la hauteur. Et sur la résistance au choc, la couche extérieure est très résistante.

### IV-2 PARAMETRE SUIVANT L'AGE

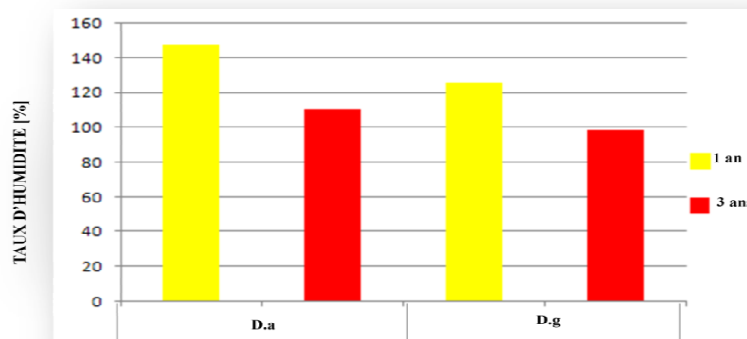
Dans cette deuxième partie, nous allons étudier les propriétés physiques : humidité, densité, retrait dimensionnel, taux d'absorption d'eau, et pour les propriétés mécaniques : la résistance à la flexion et la résistance au choc suivant l'âge.

#### IV-2-1 TAUX D'HUMIDITE

Le taux d'humidité ne varie non seulement suivant la hauteur mais suivant l'âge aussi. Les résultats sont présentés sur le tableau ci-dessous.

**Tableau IV.7 : Variation du taux d'humidité des deux espèces suivant l'âge**

Age	Dendrocalamus Asper		Dendrocalamus Giganteus	
	1ans	3ans	1ans	3ans
Taux d'humidité [%]	147,84	112,65	124,35	99,42



**Figure IV.7 : Histogramme montrant la variation du taux d'humidité des deux espèces suivant l'âge**

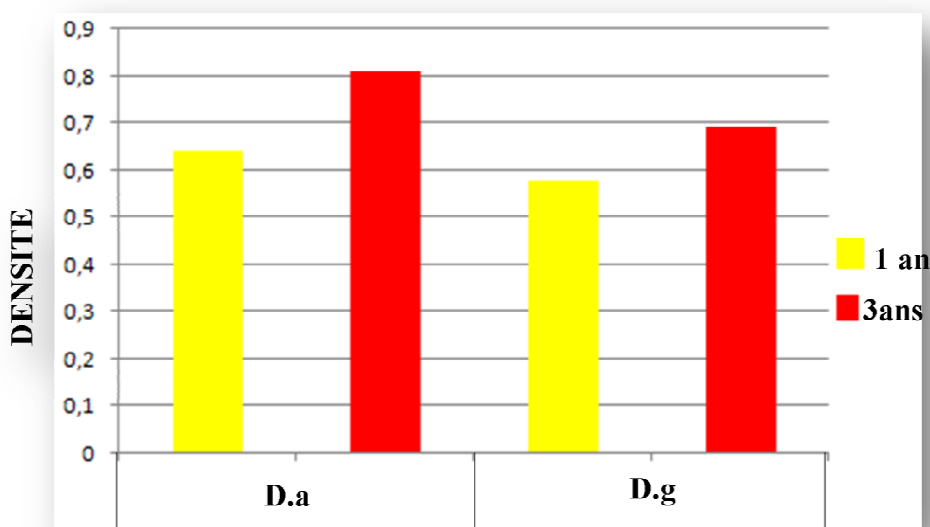
Cet histogramme nous montre que pour les deux espèces le taux d'humidité décroît entre les chaumes d'un an à trois ans. Le taux d'humidité maximal est retrouvé chez les chaumes d'un an avec une valeur moyenne de 147,84 % chez le *dendrocalamus asper* et 124,35 % chez le *dendrocalamus giganteus*. En effet, les jeunes chaumes de moins de trois ans, renferment une forte teneur en eau que les bambous matures. Ainsi l'humidité contenue dans les bambous diminue au fil du temps.

### IV-2-2 DENSITE A 12% D'HUMIDITE

La densité ne varie non seulement suivant la hauteur mais suivant l'âge aussi. Les résultats sont présentés sur le tableau ci-dessous.

**Tableau IV.8 : Variation de la densité des deux espèces suivant l'âge**

	Dendrocalamus Asper		Dendrocalamus Giganteus	
Age	1ans	3ans	1ans	3ans
Densité	0,64	0,81	0,57	0,68



**Figure IV.8 : Histogramme montrant la variation de la densité des deux espèces suivant l'âge**

Cet histogramme nous montre que contrairement au taux d'humidité, la densité augmente suivant l'âge. A trois ans, le *dendrocalamus asper* a pour densité 0,81 si elle est 0,64 à 1 an et pour le *dendrocalamus giganteus* elle est de 0,68 si elle est 0,57 à un an. En effet,



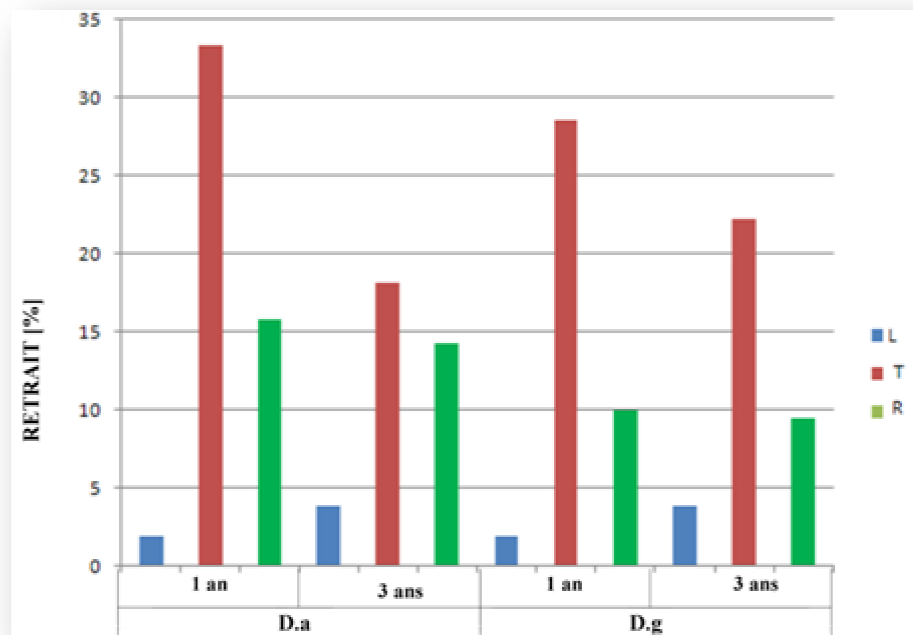
l'augmentation de la densité révèle une maturation sur les deux espèces qui s'effectuent entre les deux âges .Les fibres augmentent en nombre de la jeunesse à la maturation, ce fait est dû aux processus de dépôt d'amidon et de lignification se produisant à l'intérieur du chaume et qui s'accroissent avec l'âge.

**IV-2-3 RETRAIT**

Le retrait ne varie non seulement suivant la hauteur mais suivant l'âge aussi. Les résultats sont présentés sur le tableau ci-dessous.

**Tableau IV.9 : Variation des retraits dimensionnels des deux espèces suivant l'âge**

Age	Dendrocalamus Asper						Dendrocalamus Giganteus					
	1an			3ans			1an			3 ans		
Direction	L	T	R	L	T	R	L	T	R	L	T	R
Retrait [%]	1,92	33,33	15,78	3,92	18,18	14,28	1,92	28,57	10	3,92	22,22	9,5



**Figure IV.9 : Histogramme montrant la variation des retraits dimensionnels des deux espèces suivant l'âge**

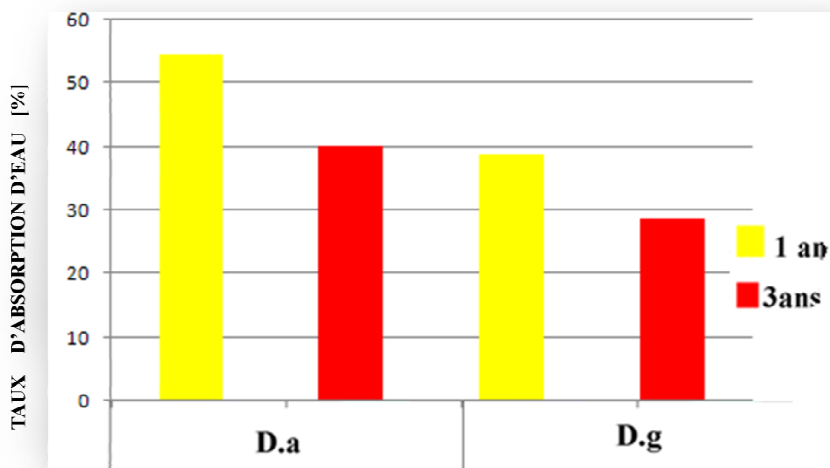
En effet, plus le taux d'humidité est élevé, plus la quantité en eau libre est grande et plus le chaume est instable, c'est-à-dire qu'il peut varier en dimension. Les retraits dimensionnels sont marqués surtout sur le plan tangentiel et radial pour ces différents âges pour les deux espèces, vu que l'eau libre ou intracellulaire remplit les vaisseaux et les vides cellulaires intérieurs des fibres.

**IV-2-4 TAUX D'ABSORPTION**

Le taux d'absorption ne varie non seulement suivant la hauteur mais suivant l'âge aussi. Les résultats sont présentés sur le tableau ci-dessous.

**Tableau IV.10 : Variation du taux d'absorption des deux espèces suivant l'âge**

Age	Dendrocalamus Asper		Dendrocalamus Giganteus	
	1ans	3ans	1ans	3ans
Taux d'absorption d'eau [%]	54, 65	39,82	37,23	28, 92



**Figure IV.10 : Histogramme montrant la variation du taux d'absorption des deux espèces suivant l'âge**

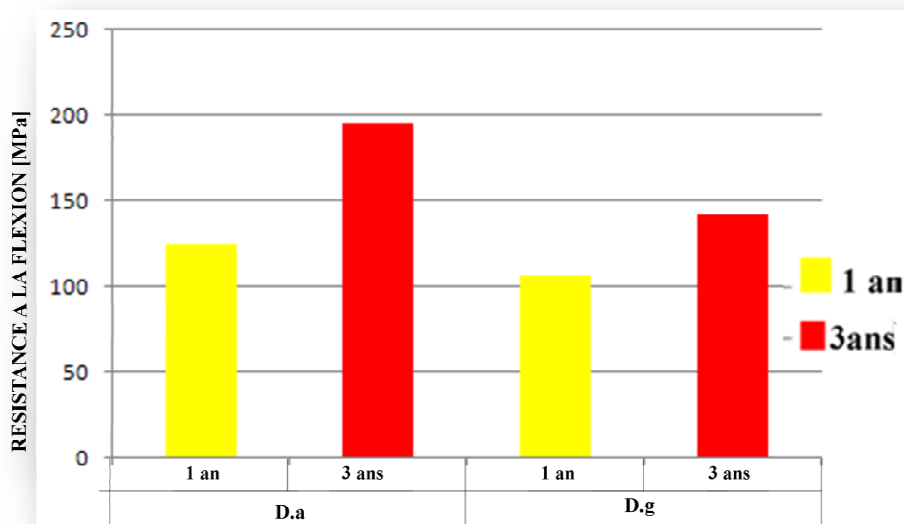
Cet histogramme nous montre que le taux d'absorption diminue quand l'âge augmente. Cette diminution est due à l'étréitesse des espaces vides puisque à cet âge le taux et l'épaisseur des fibres augmentent ce qui empêche l'entrée d'eau dans les parois.

IV-2-5 RESISTANCE A LA FLEXION

La résistance en flexion ne varie non seulement suivant la hauteur mais suivant l'âge aussi. Les résultats sont présentés sur le tableau ci-dessous.

**Tableau IV.11** : Variation de la résistance à la flexion des deux espèces suivant l'âge

	Dendrocalamus Asper		Dendrocalamus Giganteus	
Age	1ans	3ans	1ans	3ans
Resistance à la flexion [MPa]	125,76	197,78	105,63	142,59



**Figure IV.11** : Histogramme montrant la variation de la résistance à la flexion des deux espèces suivant l'âge

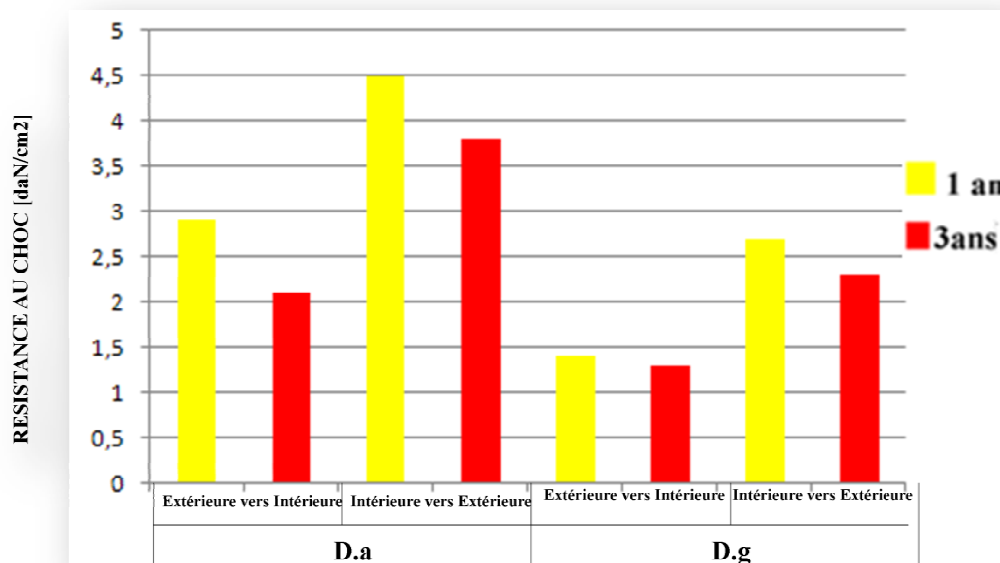
Cet histogramme nous montre que la valeur de la résistance à flexion à trois ans atteint le maximum de résistance. . Pour le *dendrocalamus asper* , sa résistance est de 197,78 [MPa] à trois ans et pour le *dendrocalamus giganteus* est de 142,59 [MPa]. En effet, à ce stade, le bambou est prêt à être transformé et façonné.

**IV-2-6 RESISTANCE AU CHOC**

La résistance au choc ne varie non seulement suivant la hauteur mais suivant l'âge aussi. Les résultats sont présentés sur le tableau ci-dessous.

**Tableau IV.12 : Variation de la résistance au choc des deux espèces suivant l'âge**

	Dendrocalamus Asper				Dendrocalamus Giganteus			
Age	1an		3ans		1 an		3ans	
Couche	E-I	I-E	E-I	I-E	E-I	I-E	E-I	I-E
Facteur de résilience [daN/cm <sup>2</sup> ]	2,9	2,1	4,5	3,8	1,4	1,3	2,7	23



**Figure IV.12: Histogramme montrant la variation de la résistance au choc des deux espèces suivant l'âge**

Cet histogramme nous montre que la résistance au choc à trois ans est élevée à celle d'un an. En effet cette résistance au choc permet de valoriser les espèces de bambou en tant que matériau de construction et architecture.

Dans cette deuxième partie, nous pouvons dire que l'âge est un facteur déterminant dans le développement des propriétés physiques et mécaniques. En général, les

bambous deviennent matures dès leur troisième année et atteignent leur optimum de leurs propriétés physiques et mécaniques. Les études ont montré que les bambous âgés (trois ans) présentent des propriétés physiques et mécaniques plus intéressantes du point de vue technologique et industriel.

### **IV-3 COMPARAISON DES DEUX ESPECES AVEC LES TYPES DE BOIS**

#### **IV-3-1 LES TYPES DE BOIS**

Comme témoins nous avons choisi cinq types de bois de Madagascar : le bois « *kesika* », le bois « *varongy* », le bois « *kininina* », le bois « *longotra* », et le bois « *Voamboana* ».

Tout d'abord nous allons donner les caractéristiques de ces bois.

##### **a) Le bois « kesika »**

Le bois « *kesika* » ou pin a une couleur claire et jaune, donc jaune pâle. Sa surface a une texture très orientée et très visible. Son nom scientifique est le « *pinus* » et il appartient à la famille des « *Pinaceae* ».Le « *kesika* » est classé parmi le bois « mi-lourd », car lors de sa caractérisation physique sa densité est 0,61.



**Photo IV.1: Le bois « kesika »**

##### **b) Le bois « Varongy »**

Le bois « *Varongy* » a une couleur claire, plutôt jaune. Sa surface présente une texture orientée et visible. Son nom scientifique est « *Ocotea cymosa* » et il appartient à la famille « *loraceae* ».Le « *varongy* » est classé parmi le bois « mi-lourd », car lors de sa caractérisation physique, sa densité est 0,63.



**Photo IV.2: Le bois « varongy »**

**c) Le bois « kininina »**

Le bois « *kininina* » ou eucalyptus a une couleur rosâtre. Sa surface a une texture très orientée et très visible. Son nom scientifique est « *eucalyptus* » et il appartient à la famille « *Myrtaceae* ». Le « *kininina* » est classé parmi le bois « mi-lourd », car lors de sa caractérisation physique, sa densité est 0,69.



**Photo IV.3: Le bois « kininina »**

**d) Le bois « longotra »**

Le bois « *longotra* » ou bois ordinaire a une couleur marron claire. Sa surface a une texture très orientée et très visible. Son nom scientifique est « *Cryptocaria* » et il appartient à la famille « *Lauraceae* ». Le « *longotra* » est classé parmi le bois « très lourd », car lors de sa caractérisation physique, sa densité est 0,9.



**Photo IV.4: Le bois « longotra »**

**e) Le bois « Voamboana de Moramanga »**

Le « *Voamboana de Moramanga* » a une teinte légèrement claire, ni rouge ni jaune (qui tend alors vers le gris). Autrement dit, sa couleur peut être assimilée à une teinte grise terne, il a une texture orientée très visible. Son nom scientifique est « *Cryptocaria* » et il appartient à la famille « *Dalbergia baroni* ». Le « *Voamboana* » est classé parmi le bois «très lourd », car lors de sa caractérisation physique, sa densité est 0,91.



**Photo IV.5: Le bois « Voamboana »**

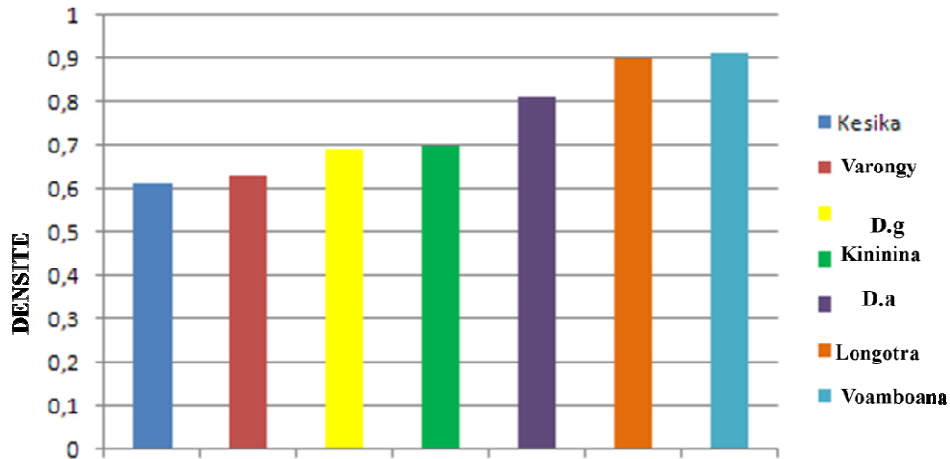
Dans cette partie, nous allons classer les deux espèces de bambou parmi les bois selon leur densité et leur résistance à la flexion. Nous avons choisi les valeurs du paramètre à l'âge de trois ans.

**IV-3-2 CLASSIFICATION SELON LA DENSITE**

Nous avons les résultats dans le tableau suivant

**Tableau IV.13** : les valeurs de la densité des deux espèces à trois ans comparées avec les types de bois

Nom	Kesika	Varongy	D.g	Kininina	D.a	Longotra	Voamboana
Densité	0,61	0,63	0,69	0,7	0,81	0,9	0,91



**Figure IV.13:** Histogramme montrant les valeurs de la densité des deux espèces à trois ans comparées avec les types de bois

Comme nous l'avons dit dans le paramètre suivant la hauteur que le *dendrocalamus asper* peut être classé parmi le type de bois lourd et le *dendrocalamus giganteus* parmi le bois mi-lourd. Donc cette hypothèse est vérifiée.

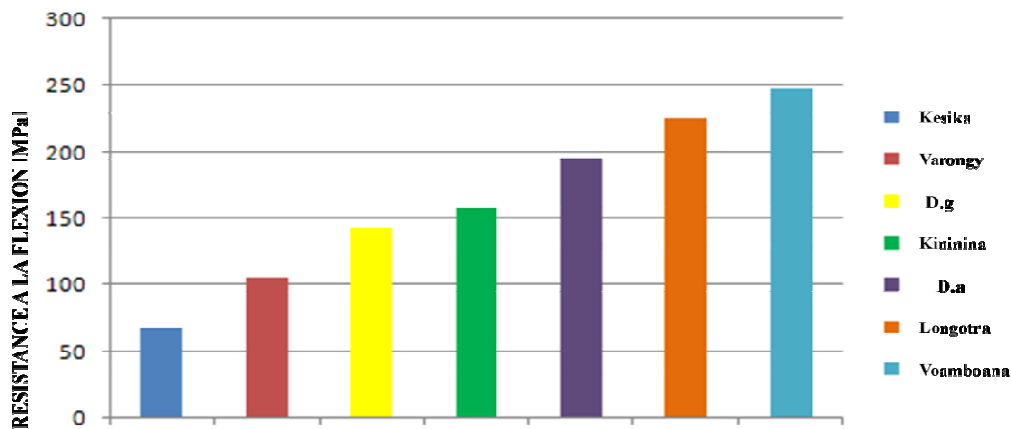
**IV-3-3 CLASSIFICATION SELON RESISTANCE A LA FLEXION**

Nous avons les résultats dans le tableau suivant

**Tableau V.14** : Valeurs de la résistance à la flexion des deux espèces à trois ans comparées avec les types de bois

Nom	Kesika	Varongy	D.g	Kininina	D.a	Longotra	Voamboana
Résistance à la flexion [MPa]	67,5	105	142,59	157,54	195,78	225	247,5





**Figure IV.14:** Histogramme montrant les valeurs de la résistance à la flexion deux espèces à trois ans comparées avec les types de bois

Cet histogramme nous montre que les deux espèces de bambou peuvent bien se concurrencer avec les types de bois dans la construction et dans l'aménagement.

A partir de ces études, nous pouvons tirer que l'espèce *DENDROCALAMUS ASPER* possède une meilleure qualité par rapport à l'espèce *DENDROCALAMUS GIGANTEUS*.

Dans cette troisième et dernière partie, nous avons vu que le *dendrocalamus asper* possède une meilleure qualité que le *dendrocalamus giganteus*. Les deux espèces de bambou peuvent bien se concurrencer avec les bois dans le domaine de la construction.

# CHAPITRE V

*Traitements du bambou et applications*

### V-1 TRAITEMENT A L'EAU DE CHAUX

Avant de transformer les bambous, il est très important de les traiter.

La présence d'amidon dans le bambou vert ou sec, rend le bambou attrayant pour ces organismes, en particulier les champignons et les insectes. Par conséquent le bambou est un sujet aux attaques de moisissures (pourriture, seulement en cas d'humidité) et d'insectes (termites).



***Photo V.1: La représentation des moisissures des bambous non traités***

Pour éviter ces derniers, le bambou doit être traité. Il y a plusieurs manières de traiter les bambous : traitement à l'eau, traitement à l'eau de chaux, traitement à l'acide borax, traitement à l'enfumage, traitement aux vidanges. Mais dans notre travail, nous avons choisi le traitement à l'eau de chaux. En effet, les qualités de la chaux sont :

- ✓ Sain et écologique
- ✓ Produit naturel
- ✓ Antiseptique
- ✓ Antifongique
- ✓ Désinfectant
- ✓ Antistatique
- ✓ Protection contre les insectes - Répulsif insectes
- ✓ Bon isolant thermique et phonique

## *Chapitre V : Traitements du bambou et applications*

---

- ✓ Anti-humidité une excellente adaptation aux changements de température et au gel
- ✓ Ignifuge et constitue un excellent retardateur d'incendie.

Au niveau de l'écologie, la chaux ne contient aucun produit issu de la chimie pétrolière. Les résidus de chaux peuvent même être compostés.

Au niveau santé, la chaux ne contient aucun formaldéhyde et aucun autre produit allergène. Grâce à ses propriétés antistatiques, la quantité de poussière est minimisée ainsi que le développement des acariens. De plus, elle est naturellement antifongique et reste idéal pour les pièces humides.

Devant ces nombreuses qualités de la chaux, et afin de proposer un traitement du bambou 100% écologique et non toxique, Nous avons mis une méthode de traitement à l'aide d'eau de chaux.

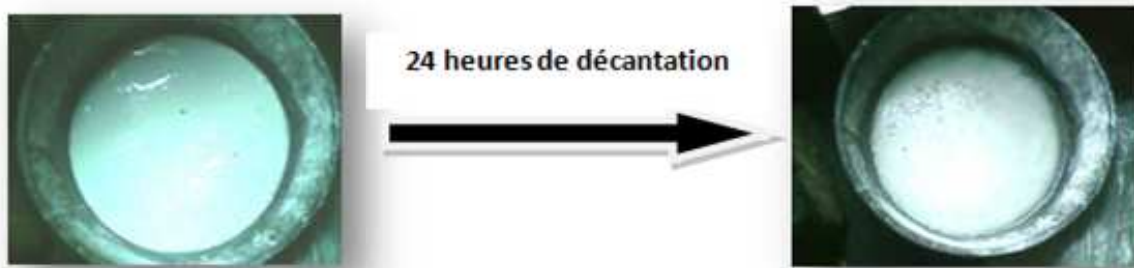


**Photo V.2 : La chaux**

### **MODE OPERATOIRE :**

Pour préparer l'eau de chaux, nous mélangeons la chaux aérienne avec l'eau. La chaux aérienne se dissout faiblement dans l'eau, il est donc nécessaire de remuer le mélange un certain temps. Cette étape aboutit à un mélange blanchâtre appelé lait de chaux. Pour éliminer la chaux éteinte non dissoute en suspension, nous laissons décanter le lait de chaux pendant 24h. On arrive finalement à l'eau de chaux, limpide.

On voit apparaitre à la surface un précipité blanc qui n'est d'autre que la réaction de l'eau de chaux, solution saturée d'hydroxyde de calcium ( $Ca(OH)_2$ ), en présence de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) qui se trouble pour former du carbonate de calcium ( $CaCO_3$ ).



***Photo V.3 : Le lait de chaux après une décantation de 24 heures***

Une fois l'eau de chaux prête, elle est transvasée par gravité dans la bassine où nous avons placé les bambous à traiter. Les bambous seront imprégnés dans l'eau de chaux par trempage pendant une semaine.



***Photo V.4 : Imprégnation des bambous fraîchement coupés dans l'eau de chaux pendant une semaine (trempage)***

En effet, il est important d'effectuer ce traitement sur des bambous fraîchement coupés. En effet, contrairement au bois, le bambou subit des modifications anatomiques et commence à rétrécir dès qu'il commence à perdre de l'eau.

La sève se précipite dans les vaisseaux, colmatant les pores des tissus. Ce qui réduit la perméabilité du bambou et par conséquent la diffusion des agents conservateurs dans les tissus du bambou.

Après 7 jours, on sort les bambous déjà traités dans la bassine et on les sèche pendant quelque jour à température ambiante.

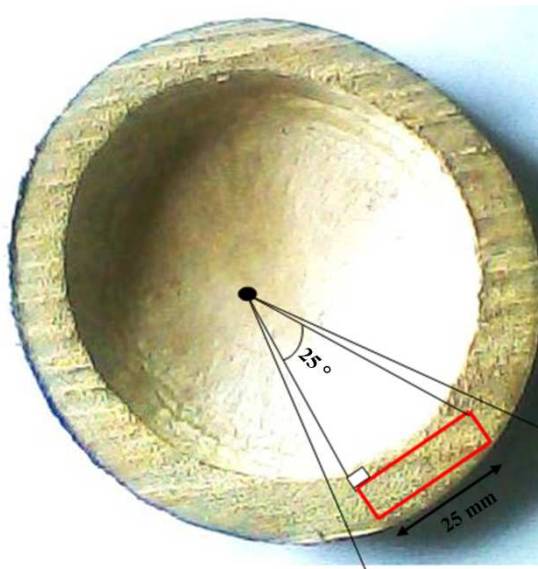


***Photo V.5 : Séchage des bambous traités avec l'eau de chaux à température ambiante***

Et c'est après que vient la transformation

### **V-2 THEORIE DE COUPE DES CHAUMES DE BAMBOU**

Pour faciliter l'usinage des chaumes, nous avons pris des mesures. Nous savons que le bambou est de forme cylindrique donc pour les transformer en éprouvette de forme aplatie, on tient compte de la largeur pour avoir un angle  $\alpha$ . Prenons le cas de la photo ci-dessous, si on veut avoir une largeur de 25mm, il faut que  $\alpha$  soit  $25^\circ$ . Mais nous savons que lors de l'usinage il y a des parties à dégauchir et à raboter, donc on augmente de 5 à 10 mm la largeur.



***Photo V.6: Coupe des chaumes de bambou avec l'angle et la largeur***

### V-3 ENCOLLAGE

Dans notre travail, les bambous sont collés à l'aide d'une colle polyester insaturé isophtalique qui est une colle bicomposante thermodurcissable dont les caractéristiques ont les suivantes :

#### a) Résine

Dans notre travail, nous avons utilisé une résine polyester insaturé pré-accélééré isophtalique **UPE 1143**<sup>[Annexe III page R]</sup> dont les avantages sont :

- résistance mécanique plus élevée ;
- meilleure résistance à l'eau ;
- résistance élevée aux rayons UV ;
- manipulation aisée, facile à mélanger ;
- très bon rapport qualité/prix ;
- retrait moindre comparé à la résine orthophtalique

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques de la résine

**Tableau V.1 : Caractéristique de la résine utilisée**

SPECIFICATIONS	
Viscosité à 25 °C	2,5 - 27
Index thixotropique	2,3 - 2,5
Temps de gélification à 25°C (2% PMEK)	15 – 20 [min]
Pic exothermique	180 – 190 [°C]
Aspect du liquide	Rose
Tenue acide	6 – 13 [mg KOH/g]
Densité	1,08 – 1,10 [g/cm <sup>3</sup> ]
Stabilité à 25°C	12 [mois]
PROPRIETES MECANIKES	
Résistance à la traction	102 [MPa]
Résistance à la flexion	182 [MPa]
Résistance à la compression	219 [MPa]
Absorption d'eau après 7 jours	56 [mg]
Dureté Barcol	42

### b) Catalyseur

Dans notre travail nous utiliserons le peroxyde de méthyléthylecétone plus connu par son abréviation PMEK(en anglais MEPK) de marque **CUROX M-200**<sup>[Annexe IV page 5]</sup>. C'est un peroxyde dérivé de cétone. Il est employé comme catalyseur dans les résines insaturées de polyester au niveau de 0,5 à 2% sur la masse totale de la résine.

Le tableau suivant présente quelques propriétés du peroxyde de méthyléthylecétone,

**Tableau V.2 :** Caractéristique du catalyseur utilisé

PROPRIETES	CARACTERISTIQUES/VALEURS
Aspect	liquide sans couleur
Oxygène actif	approx. 8,8 – 9,4 % [w/w]
Agent de désensibilisation	phtalate
Densité à 20 °C	approx. 1,1 [g/cm <sup>3</sup> ]
Viscosité à 20°C	approx. 30 [mPa.s]
Miscibilité	Immiscible avec l'eau, soluble au phtalate
Température critique (SADT)	approx. 60 [°C]
Stabilité d'entreposage au froid	Liquide au-dessous de 25 [°C]
Température de stockage recommandée	Au-dessous de 30 [°C]
Stabilité à 25°C	12 [mois]



### V-3-1 MISE EN ŒUVRE DU COLLAGE

#### ➤ PREPARATION DES SUPPORTS

Les surfaces à coller doivent être planes, sèches, dépoussiérées et dégraissées.

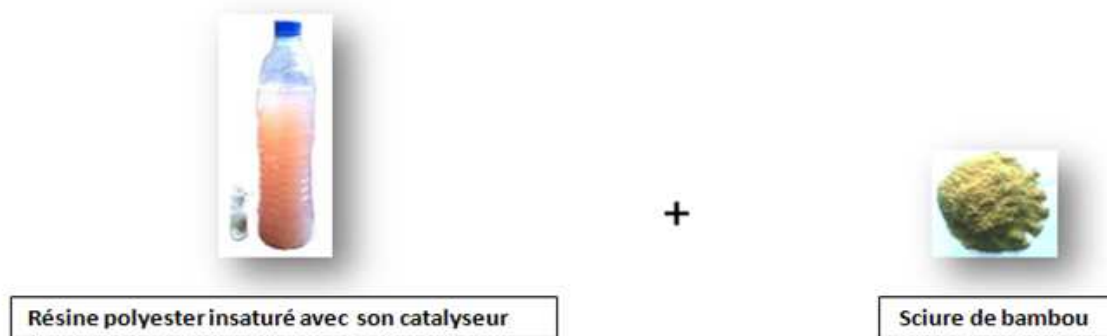
Stabiliser les bois 24 heures avant le collage

#### ➤ PREPARATION DU MELANGE COLLANT

Au moment de l'emploi, la résine est additionnée de catalyseur. La proportion du catalyseur est de 1,5% en masse de la résine.

### V-3-2 PROCESSUS DU COLLAGE

- Appliquer une couche de résine catalysée sur les surfaces à assembler et dans les endroits exigus avec un pinceau
- Modifier le mélange en y incorporant des charges appropriées jusqu'à ce que le mélange devienne assez épais pour combler tous les espaces entre les surfaces à assembler et éviter les joints manquants des résines. Notre charge n'est autre que la sciure de bambou provenant du sciage lors de la transformation.



***Photo V.7: La résine polyester insaturé et son catalyseur avec la sciure du bambou qui est utilisé comme charge***

- Serrer les pièces avec un dispositif de serrage adéquat pour maintenir les composants en place.
- Laisser durcir complètement avant d'enlever les dispositifs de serrage et poncer enfin.

### V-4 TRAITEMENT DU BAMBOU AVEC LA RESINE POLYESTER

L'opération consiste à enrober les éprouvettes en bambou dans un certain volume de polyester encore liquide. Dans notre cas nous avons mis trois couches du polyester, puis à faire durcir cette résine qui englobera les échantillons. On obtient ainsi un emballage permanent protégeant la pièce contre les différents agents extérieurs. De plus l'indice de réfraction élevé de la résine durcie, permettait de mettre particulièrement en valeur la texture du bambou.



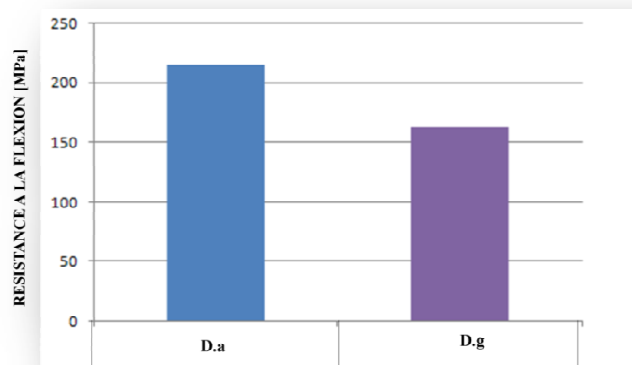
**Photo V.8:** Protocole pour le traitement du bambou avec la résine polyester

#### V-4-1 RESISTANCE A LA FLEXION

Ensuite nous avons étuvé les échantillons à une température 75°C pendant quelques heures. Et c'est après quelques jours qu'on procède au test de résistance à la flexion. Les résultats sont indiqués dans le tableau suivant.

**Tableau V.3:** Valeurs de la résistance à la flexion des deux espèces traitées avec le polyester

Espèces	Dendrocalamus asper	Dendrocalamus giganteus
Résistance à la flexion [MPa]	215,85	162,37



**Figure V.1:** Histogramme montrant les valeurs de la résistance à la flexion des deux espèces traitées avec le polyester

## **Chapitre V : Traitements du bambou et applications**

---

Cet histogramme nous montre qu'il est très intéressant de traiter les bambous avec la résine polyester insaturé. Non seulement, la résine les protège contre les agents extérieurs mais améliore aussi la résistance mécanique à la flexion. Avant la résistance mécanique des échantillons en bambou non traité est de 195,78 [MPa] mais après avoir traité nous avons atteint la maximum résistance jusqu'à 215,85[MPa] pour les *dendrocalamus asper* de même pour le *dendrocalamus giganteus* avant c'était 142,59 [MPa] et après avoir traité sa valeur est de 162,37 [MPa]. En effet, le polyester déjà catalysé encore à l'état liquide entre dans les pores du bambou et au moment du durcissement la résine est renforcé par ces fibre. Donc le traitement avec du polyester est nécessaire pour une meilleure résistance de bambou et une durée de vie assez longue.

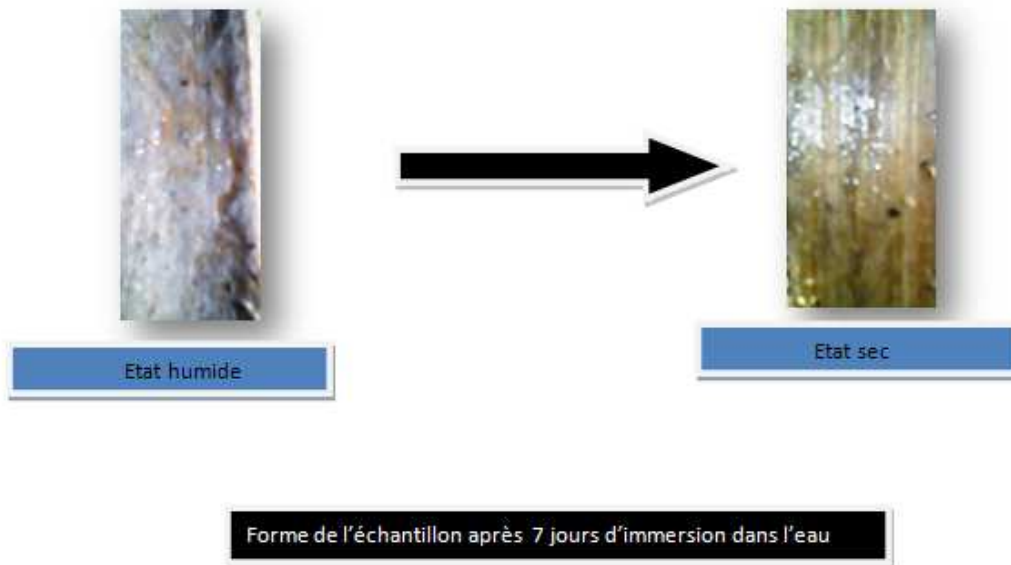
### **V-4-2 TEST DE RESISTANCE A L'EAU**

Pour le test de résistance à l'eau, nous avons utilisés autres les échantillons qui sont déjà traité avec le polyester. Nous l'immergeons dans l'eau pendant une semaine.



***Photo V.9: Immersion des échantillons en bambou traités avec du polyester dans l'eau pendant 7 jours***

Après une semaine, on les sort dans l'eau. Nous constatons que les couches de résine polyester ne dissout pas dans l'eau, elle reste intact sur les couches des échantillons et lors de son séchage à température ambiante, la résine reprend son éclat.



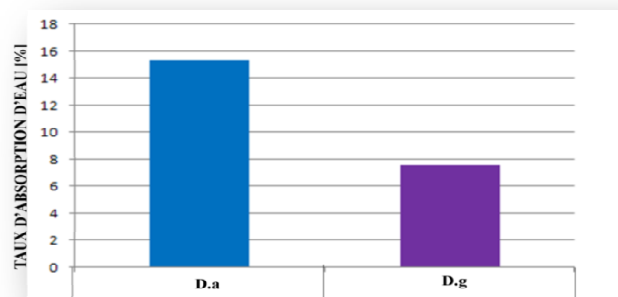
**Photo V.10:** La forme de l'échantillon en bambou traité avec du polyester après l'immersion dans l'eau et sa forme après son séchage

Ce qui veut dire que notre résine résiste bien à l'eau. Mais il est encore intéressant de mesurer le taux d'absorption d'eau dans ce bambou après l'immersion et sa résistance en flexion après son séchage.

### a) Résultat sur le taux d'absorption

**Tableau V.4:** Valeurs du taux d'absorption d'eau deux espèces traitées avec le polyester

Espèces	Dendrocalamus asper	Dendrocalamus giganteus
Taux d'absorption [%]	15,77	7,78

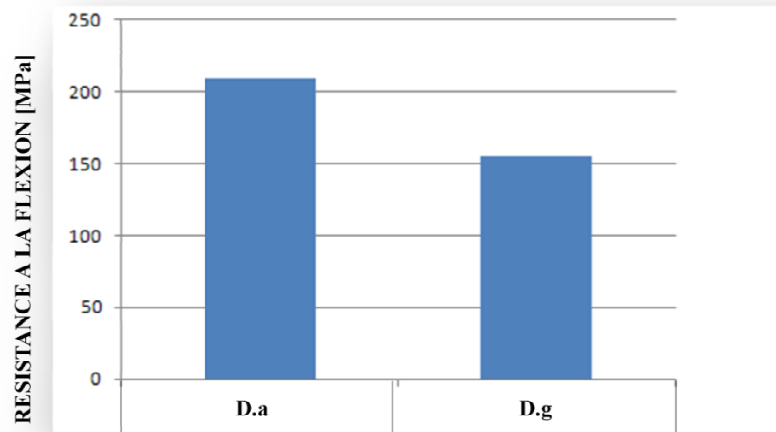


**Figure V.2:** Histogramme montrant les valeurs du taux d'absorption d'eau des deux espèces traitées avec le polyester

### b) Résultat sur la résistance à la flexion

**Tableau V.5 :** Les valeurs de la résistance à la flexion des deux espèces traitées avec le polyester après l'immersion dans l'eau

Espèces	Dendrocalamus asper	Dendrocalamus giganteus
Résistance à la flexion [MPa]	209,39	155,12

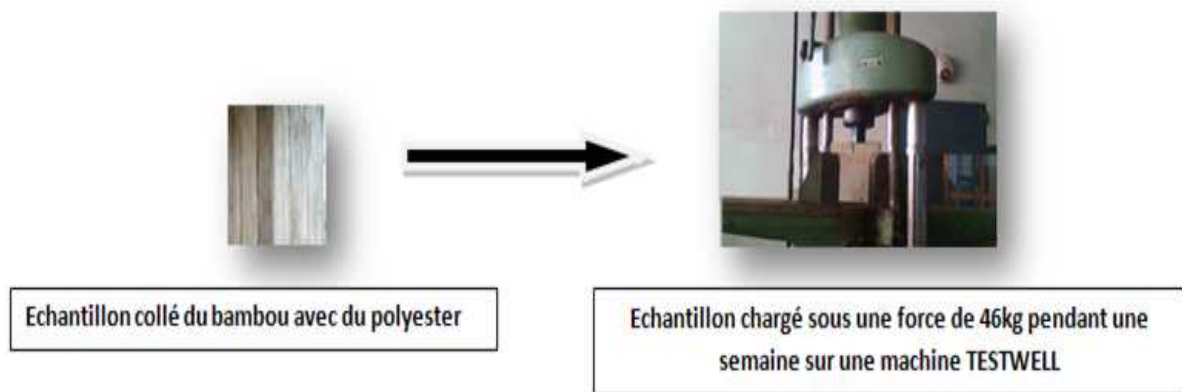


**Figure V.3:** Histogramme montrant les valeurs de la résistance à la flexion des deux espèces traitées avec le polyester après l'immersion dans l'eau

Ces résultats nous montrent que : à l'état hydraté, le taux d'absorption diminue et la résistance à la flexion pour les deux espèces ne varie pas trop. Pour le taux d'absorption, à l'état non hydraté, le taux d'absorption est de 39,82 [%] pour le *dendrocalamus asper* et à l'état hydraté, il diminue à 15,77 [%]. Concernant la valeur de la résistance à la flexion pour le *dendrocalamus giganteus* à l'état non hydraté, elle est de 162,37 [MPa] et à l'état hydraté, elle est de 155,12 [MPa]. Donc l'emploi de la résine polyester est très important pour une meilleure résistance à l'eau.

### **V-5 TEST DE FLUAGE**

Le test de fluage selon la norme britannique B.S 3544 sert à déterminer la résistance d'un joint de colle à bois par rapport à une sollicitation statique longue. Par adhésif testé nous sollicitons cinq éprouvettes différentes. Le test est réalisé sur la machine TESTWELL universelle sous atmosphère normale à une charge de 46 kg. Le temps de l'essai est de 7 jours, et les éprouvettes non cassées et cassées étant notées tous les jours.



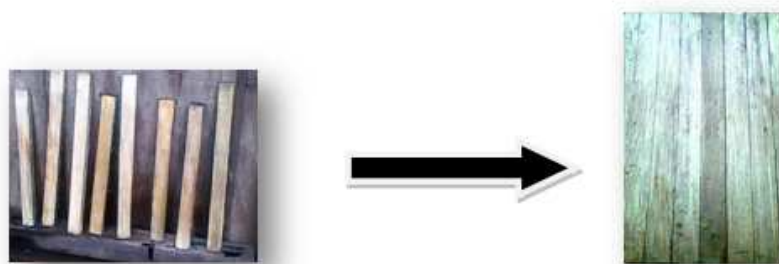
***Photo V.11: Test de fluage***

Comme résultat, le test de fluage est réussi car aucune des 5 éprouvettes n'est cassée après un temps d'essai de sept jours.

### **V-6 ASSEMBLAGE DES BAMBOUS**

Comme le bois, le bambou peut être assemblé à la forme voulue. Dans notre travail, nous avons choisi trois types d'assemblage.

#### **a) Assemblage simple**



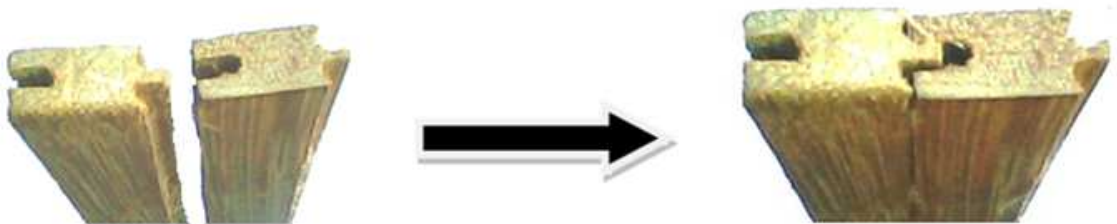
***Photo V.12: Assemblage simple***

### b) Assemblage à mi-bois



*Photo V.13: Assemblage à mi-bois*

### c) Assemblage à rainure languette



*Photo V.14: Assemblage à rainure languette*

## V-7 APPLICATIONS DES BAMBOUS

Ces deux espèces de bambou sont valorisables de un an et trois ans. A un an, on trouve le contreplaqué, et à trois ans : le plancher, le parquet, la volige et le lamellé collé.

### - Le plancher



*Photo V.15: Le plancher*

- **Le parquet**



***Photo V.16: Le parquet***

- **La volige**



***Photo V.17: La volige***

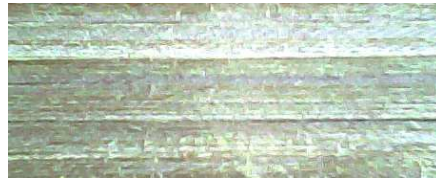
- **Le contreplaqué**



***Photo V.18: Le contreplaqué***



- Le lamellé collé :



**Photo V.19: Le lamellé collé**

### **V-8 AVANTAGE DES PRODUITS EN BAMBOU**

Le bambou est sans aucun doute un des plus anciens matériaux de construction. Il présente plusieurs avantages par rapport à d'autres matériaux d'origine végétale:

- grande facilité d'adaptation aux différents sols et climats auxquels il est soumis ;
- croissance rapide, il est exploitable dès son premier âge.
- facilement transportable, légèreté des chaumes ;
- résistance mécanique élevée ;
- possibilité inépuisable de création de produits dérivés à partir de lamelles refendues, de particules et de fibres ;
- utilisation possible dans la construction moderne ;
- fibres utilisable dans l'industrie de la pâte à papier et des panneaux composites

*Conclusion*

L'objectif de notre travail est d'étudier et de valoriser l'espèce du bambou « *dendrocalamus asper* » et l'espèce « *dendrocalamus giganteus* » en vue de les valoriser en matériau de construction de qualité.

Dans la partie bibliographique, nous avons parlé du matériau bambou en général : caractérisation, étude anatomique, propriété physico-chimique et mécanique. Nous avons aussi traité les généralités sur les résines polyesters qui seront utiles lors de nos réalisations.

Les études expérimentales sur les caractérisations physico-mécaniques suivant la hauteur, nous montrent que : le taux d'humidité diminue, au contraire la densité à 12% d'humidité augmente. Pour le retrait, il est marqué par la direction tangentielle. Le taux d'absorption diminue aussi en fonction de la hauteur. Sur les propriétés mécaniques, la résistance en flexion diminue suivant la hauteur. Et sur la résistance au choc, la couche extérieure est très résistante. Suivant l'âge, les bambous matures présentent des propriétés physiques plus intéressantes. Dans la caractérisation physique, pour la densité, le *dendrocalamus asper* est de **0,81** et le *dendrocalamus giganteus* **0,69**. Concernant la caractérisation mécanique, pour la résistance à la flexion, le *dendrocalamus asper* est de **195,78 [MPa]** et le *dendrocalamus giganteus* **142,59 [MPa]**. Comparées avec les autres types de bois, ces deux espèces de bambou peuvent bien se concurrencer dans le monde de la construction et de l'architecture et l'espèce *dendrocalamus asper* présente une qualité meilleure que le *dendrocalamus giganteus*.

Pour améliorer sa résistance mécanique et sa durée de vie, nous l'avons traité avec de la chaux et de la résine polyester qui n'est autre que son liant lors de l'assemblage. Comme application, nous avons trouvé : le plancher, le parquet, la volige, le contreplaqué, le lamellé collé.

En perspective d'autres études doivent être encore entreprises pour les autres applications de ces bambous. Par exemple, l'utilisation directe des chaumes pour renforcer les dalles de béton, utilisation des lamelles de bambou comme armature pour des constructions à petite échelle, l'utilisation de fibres de bambou dans les ciments renforcés par des fibres naturelles qui est un matériau composite.

# *Bibliographie*

- [1] **AHMAD, A.**, MODELISATION DE SECHAGE SOUS VIDE DISCONTINU DU BOIS DE CHENE : INTEGRATION DE CRITERE DE QUALITE MECANIQUE, *Thèse de Doctorat en science du bois, Université de Bordeaux*, 2004.
- [2] **ALIPON M., BONDAD E. ET MORAN S.**, EFFECT OF SILVICULTURAL MANAGEMENT ON THE BASIC PROPERTIES OF BAMBOO, 23p, 2009
- [3] **BEAUCHENE, J.**, LES AGENTS DE DEGRADATION DU MATERIAU BOIS, *Cirad*, 1994
- [4] **BYSTRIAKOVA N., KAPOS V. ET LYSENKO I.**, BAMBOO BIODIVERSITY: AFRICA, MADAGASCAR AND THE AMERICAS, *Unep-Wcmc/Inbar*. 2004
- [5] **COURTOIS, B.**, PRODUITS DE TRAITEMENT DU BOIS : COMPOSITION, DANGERS, MESURES DE PREVENTION, *Paris : INRS*, 2006
- [6] **DAGUZE DOMINIQUE** , CONCEPTION DES STRUCTURES EN BOIS LAMELLE-COLLE , *Paris* , 1992
- [7] **DOAT J.**, Les BAMBOUS: SOURCES EVENTUELLES DE CELLULOSE POUR L'AFRIQUE, *revue bois et forets des tropiques*, n°113, 1967
- [8] **FOUGEROUSSE.**, DURABILITE NATURELLE DU BOIS, *Bois et Forêt des Tropiques*, 36 : 42-56,1960
- [9] **FONLUPT S.**, LE BAMBOU DANS LA CONSTRUCTION, *Séminaire piloté par le Département Génie Civil et Construction*, 2008
- [10] **GNANAHARAN R., JASSEN J.J.A & ARGE O.**, BENDING STRENGTH OF GUADA BAMBOO - COMPARISON OF DIFFERENT TESTING PROCEDURES, *Inbar Working Paper No.3.FAO, Rome*, 1995
- [11] **GROSSER D. & LIESE W.**, ON THE ANATOMY OF ASIAN BAMBOOS, WITH SPECIAL REFERENCE TO THEIR VASCULAR BUNDLES, *Wood Science and Technology* 5: 290-312, 1971
- [12] **GUENEAU, P ., ET GUENEAU, D.**, PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES BOIS MALGACHES, *Centre technique Forestier tropical-Tananarive Madagascar*, 1969
- HARGOT B** , ETUDE, REALISATION ET ANALYSE DE POUTRES LAMELLE-COLLE EN BAMBOU, *Bruxelles* , 2009
- [13] **HIZIROGLU, S.**, SELECTED PROPERTIES OF MEDIUM DENSITY FIBERBOARD (MDF) PANELS MADE FROM BAMBOO AND RICE *Forest Product Journal* 57, 6: 46-50, 2007

- [14] **KISHEN, GHOSH J.D.P. ET REHMAN M.A**, STUDIES ON MOISTURE CONTENT, SHRINKAGE, SWELLING AND INTERSECTION POINT OF MATURE (DENDROCALAMUS STRICTUS) MALE BAMBOO.  
*Indian For. Rec.* 1: 1-30 , 1956
- [15] **LI X.**, PHYSICAL, CHEMICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BAMBOO AND IT'S UTILIZATION POTENTIAL FOR FIBERBOARD MANUFACTURING,  
*The School of Renewable Natural Resources*, 2004
- [16] **LIESE, W.**, ANATOMY AND PROPERTIES OF BAMBOO", INSTITUTE OF WOOD BIOLOGY AND WOOD PRESERVATION OF FEDERAL RESEARCH CENTER FOR FORESTRY AND FOREST PRODUCTS, *Inbar. pr* 03:1 , 1985.
- [17] **LIESE, W., GROSSER, D.**, ON THE ANATOMY OF ASIAN BAMBOOS, WITH SPECIAL REFERENCE TO THEIR VASCULAR BUNDLES, *Wood Science and Technology* 5: 290-312, 1971.
- [18] **PARKHKEREE, T.**, PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD FROM SWEET-BAMBOO CULMS (DENDROCALAMUS ASPER BACKER.),  
*Thesis, Kasetsart University, Bangkok*, 1997
- [19] **RABOT-QUERCI**, MISE AU POINT D'UN MODE D'ASSEMBLAGE SUR DU BAMBOU,  
*Mémoire de DEA de l'Université Henri Poincaré, Nancy I*, 2001
- [20] **SUZUKI, K., ITOH, T.**,THE CHANGE IN CELL WELL ARCHITECTUR DURING LIGNIFICATIONS OF BAMBOO, PHYLLOSTACHYS AUREA,  
*Trees-structure and function* 15, 3: 137-147, 2001
- [21] **TOUSSAINT P.**, APPLICATION ET MODELISATION DU PRINCIPE LA PRECONTRAINTE SUR DES ASSEMBLAGES DE STRUCTURE BOIS,  
*Thèse de doctorat en Sciences du Bois et des Fibres*, 2010
- [22] **WAKCHAURE, M., & KUTE, S.**, EFFECT OF MOISTURE CONTENT ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BAMBOO,  
*Asian journal of civil engineering*, 6: 753-763, 2012
- [23] **WEI-CHI LIN**, CULTURE DU BAMBOU A MADAGASCAR, *Centre de Formation pour l'Artisanat du Bambou Sino-Malagasy*, 1970
- [24] **ZHOU ET AL.** (2005), ECOLOGICAL FUNCTIONS OF BAMBOO FOREST : RESEARCH AND APPLICATION,  
*Journal of Forestry Research*, 16: 143-147.

# *Annexes*

# ANNEXE I

Dans cette partie, nous allons voir les différentes opérations pour la transformation du bambou à l'état brute en plaquettes pour les caractérisations physiques et caractérisations mécaniques.

La confection des échantillons a été réalisée au laboratoire bois et menuiserie du Bloc Technique d'Ankatso.

## A-1 DIMENSIONNEMENT DES ECHANTILLONS

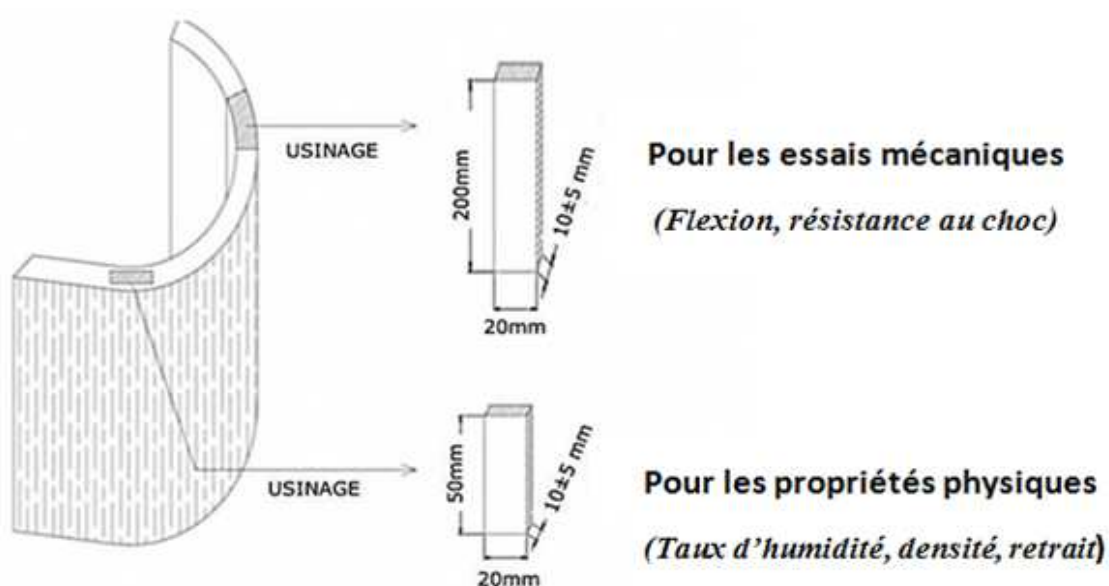
Les échantillons sont confectionnés suivant les normes suivantes :

- pour les essais mécaniques (flexion, résistance au choc) elle est conforme à la norme **NF B 51-008, NF B 51-009** de dimension :

**Longueur = 200 mm, largeur = 20 mm, épaisseur = 10 ± 5 mm**

- pour les déterminations des propriétés physiques (taux d'humidité, densité, retrait), elle est conforme à la norme **NF B 51-004, NF B 51-005, NF B 51-006** de dimension :

**Longueur = 50 mm, largeur = 20 mm, épaisseur = 10 ± 5 mm**

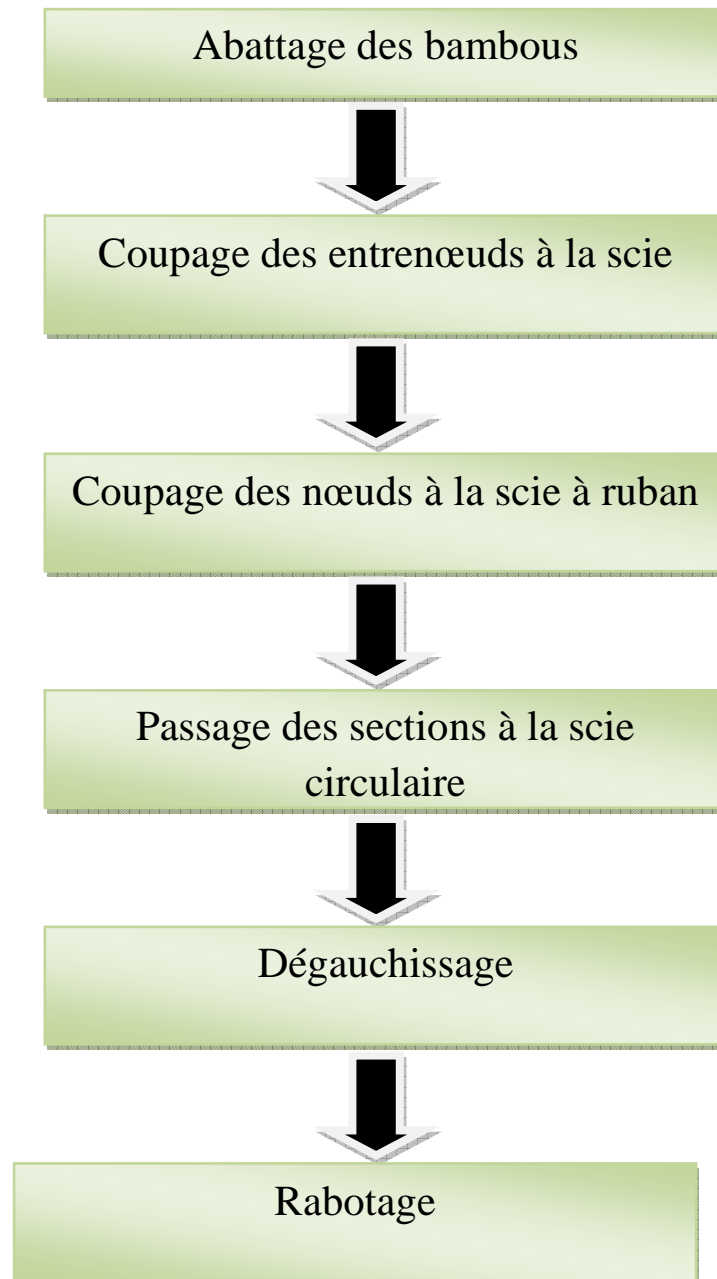


***Figure A.1: Dimensionnement des échantillons***



# ANNEXE I

## Protocole d'usinage des chaumes



***Figure A.2 : Protocole d'usinage des chaumes***

# ANNEXE I

## a) Abattage des bambous

Cette opération consiste à couper les bambous, pour cela on utilise une hache.

## b) Coupage des chaumes

Cette opération consiste à couper les chaumes, pour faciliter son transport, nous avons scié cette longue tige de bambou en trois entrenœuds chacune et nous avons numéroté chaque entrenœuds afin de ne pas les confondre.

Arrivé à Antananarivo, pour se débarrasser des nœuds, nous avons effectué l'opération sur la scie à ruban



***Photo A.1** : Coupes des nœuds avec la scie à ruban*

Après le coupage, nous avons obtenu des bambous de forme cylindrique creux.



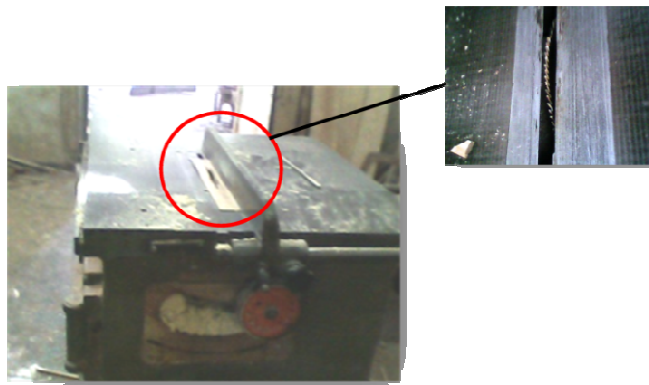
***Photo A.2**: Les entrenœuds des bambous après le sciage*

# ANNEXE I

## c) Passage des sections à la scie circulaire

Dans une scie circulaire stationnaire, la lame est encastrée dans une table et passe à travers une fente prévue à cet effet. Un mécanisme est prévu pour régler la hauteur de la lame qui dépasse au-dessus du plan de travail, ainsi que son inclinaison pour permettre des coupes de biais (entre  $0^\circ$  et  $45^\circ$ ). Ce type de scie possède généralement un guide parallèle à la lame et un guide coulissant perpendiculaire à la lame, ce qui permet d'effectuer des coupes droites longitudinales et transversales en maintenant la pièce à découper dans la position désirée lors de la découpe. C'est la pièce à couper qui vient à la rencontre de l'outil.

La scie circulaire stationnaire permet de faire des coupes régulières et très précises.



***Photo A.3: La machine à scie circulaire***

Le tranchage des chaumes est montré sur les photos ci dessous avec une surépaisseur des dimensions données précédemment.



***Photo A.4 : Opération sur la machine à scie circulaire***

Donc nous avons les formes suivantes pour les deux espèces.

# ANNEXE I



**Dendrocalamus Giganteus**

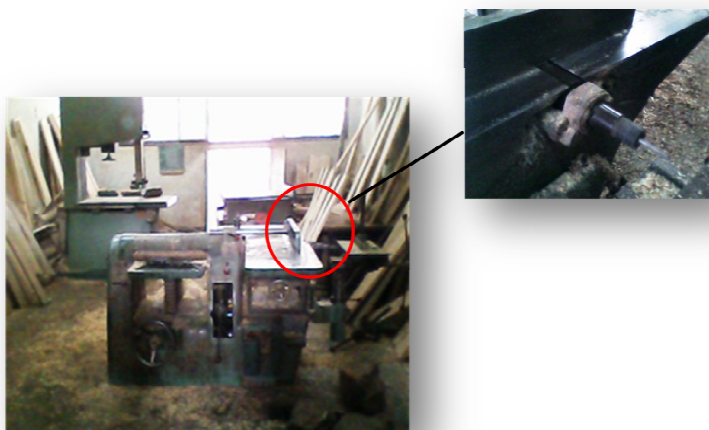


**Dendrocalamus Asper**

***Photo A.5:** La forme obtenue après le passage sur la machine à scie circulaire*

## **d) Dégauchissage**

Après avoir obtenu les formes, nous passons au dégauchissage. Le dégauchissage est un procédé utilisé en menuiserie, qui consiste à corriger la gaucherie (donc le caractère inégal ou bancal) des éprouvettes en bambou, en rendant leur forme unie. L'opération s'effectue sur une machine raboteuse-dégauchisseuse.



***Photo A.6:** La machine dégauchisseuse*

# ANNEXE I

Les photos ci-dessous nous montrent l'opération dégauchissage



***Photo A.7: L'Opération dégauchissage***

Afin d'avoir une des dimensions précises, on rectifie de nouveau les échantillons sur la scie circulaire.



***Photo A.8: La rectification***

## **e) Rabotage**

L'opération qui suit est le rabotage. Cette opération permet d'aplanir les plaquettes de bambou. Elle s'effectue sur une machine raboteuse.



***Photo A.9: La machine raboteuse***

# ANNEXE I

Cette opération permet d'avoir une épaisseur précise et permet aussi d'éliminer les couches vertes sur la partie extérieure du bambou.



***Photo A.10: L'opération rabotage***

Finalement, pour avoir des longueurs précises, on les coupe selon les dimensions données. Et nous obtenons les échantillons suivants.



***Photo A.11: Les plaquettes des bambous pour les essais***

Cette partie nous a permis de voir les dimensions des échantillons à travailler, les différentes opérations de transformations, telle que le : coupage, dégauchissage, rabotage. La partie qui suit est une partie très importante car nous allons voir les différents modes opératoires pour la caractérisation physique et la caractérisation mécanique qui nous permet d'avoir des résultats.

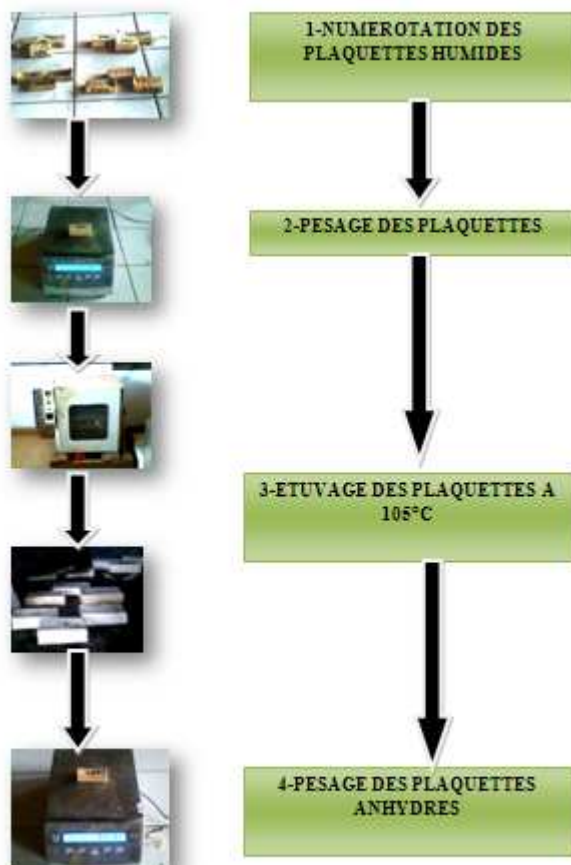
# ANNEXE I

## A-2 POUR LES CARACTERISATIONS PHYSIQUES

Les caractérisations physiques regroupent : la teneur en eau ou taux d'humidité, la densité à 12% d'humidité, le retrait dimensionnel et le taux d'absorption d'eau. Elles ont été effectuées au laboratoire Génie Chimique de Vontovorona.

### A-2-1 TENEUR EN EAU (NF B 51-004)

Soient trois plaquettes de bambous pour chaque espèce et coupées selon les trois parties : inférieure, moyenne et supérieure .Tout d'abord, on numérote les éprouvettes. On pèse chaque échantillon avec une balance électronique de précision 0,1 g pour obtenir la masse initiale à l'humidité .Puis, on introduit ces échantillons dans une étuve chauffée à 105°C. Le pesage de chaque plaquette se fait en respectant un intervalle d'une heure, jusqu'à ce qu'on obtienne des valeurs constantes de masses.



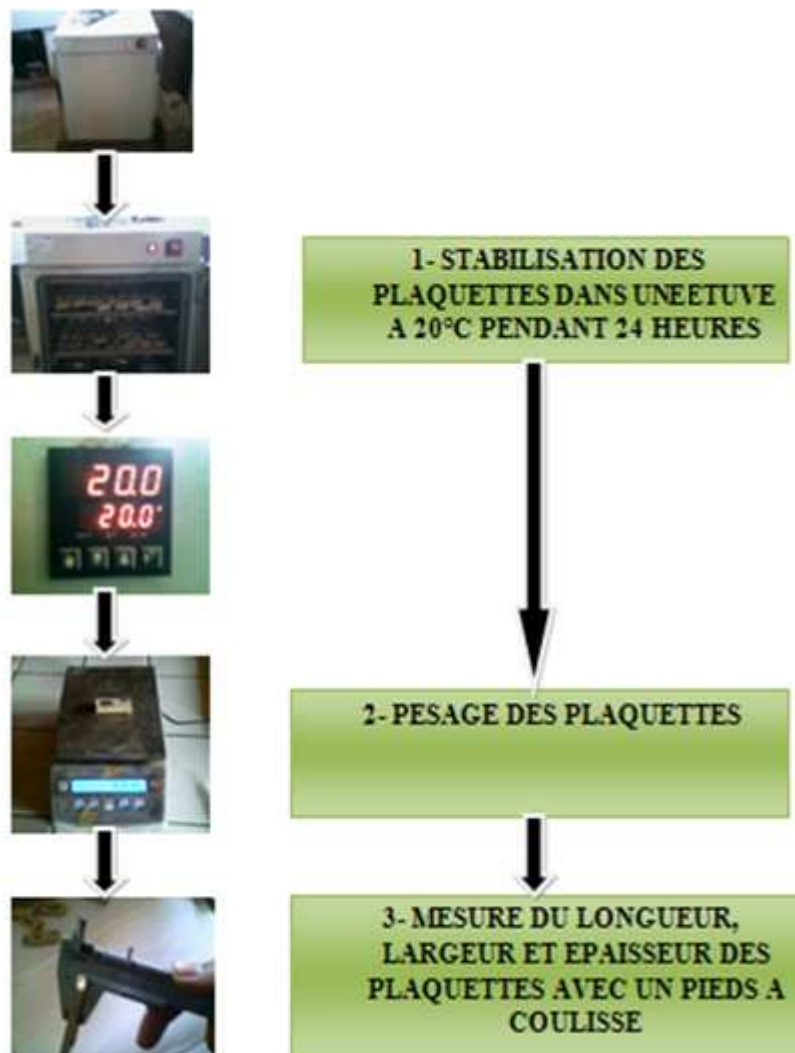
***Photo A.12: Le protocole pour la mesure du taux d'humidité***



# ANNEXE I

## A-2-2 DENSITE A 12% D'HUMIDITE (NF B 51-005)

Tout d'abord les éprouvettes ont été placées dans une étuve stabilisée à 20°C et à une humidité relative de l'air égale à 65%, afin d'obtenir l'équilibre hygrométrique à 12%. L'équilibre a été atteint quand la masse des éprouvettes est constante dans un intervalle de 24 heures. Une fois que les échantillons ont été stabilisés à 12% d'humidité, leurs masses ont été pesées à l'aide d'une balance électronique d'une précision de 0,1g. C'est après le pesage que s'est effectuée la mesure du volume à l'aide d'un pied à coulisse <sup>[Annexe II page O-P-Q]</sup>.



***Photo A.13:** Le protocole pour la mesure de la densité*

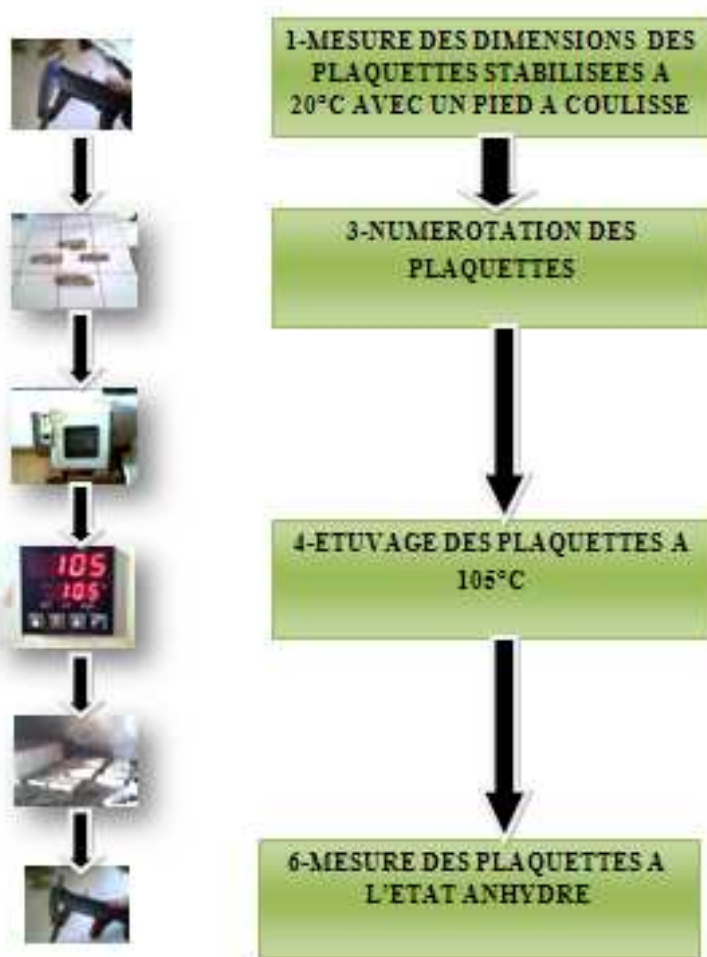


# ANNEXE I

## A-2-3 RETRAIT (NF B 51-006)

L'essai de mesure du retrait a été réalisé conformément à la norme NF B51-006 (AFNOR, 1985), sur les mêmes éprouvettes qui ont été utilisées lors de la mesure de la densité.

La démarche consiste tout d'abord à mesurer les dimensions des éprouvettes à l'état saturé en utilisant un pied à coulisse. Ensuite, pour les ramener à l'état anhydre, les éprouvettes sont placées dans une étuve ventilée, réglée à une température de 105°C jusqu'à ce que leurs masses soient constantes. Puis elles sont une nouvelle fois mesurées pour obtenir leurs dimensions à l'état anhydre.



***Photo A.14: Le protocole pour la mesure des retraits dimensionnels***

# ANNEXE I

## A-2-4 TAUX D'ABSORPTION D'EAU

L'opération consiste à stabiliser les éprouvettes anhydres sorties de l'étuve à température ambiante. Ensuite, on pèse ces échantillons, puis on les immerge dans l'eau pendant 24 heures. C'est à la fin qu'on pèse ces échantillons à l'état hydraté.



***Photo A.15:** Le protocole pour la mesure du taux d'absorption*

# ANNEXE I

## A-3 POUR LES CARACTERISATIONS MECANIQUES

Les essais mécaniques ont été réalisés au laboratoire, Bloc Technique d'Ankatso

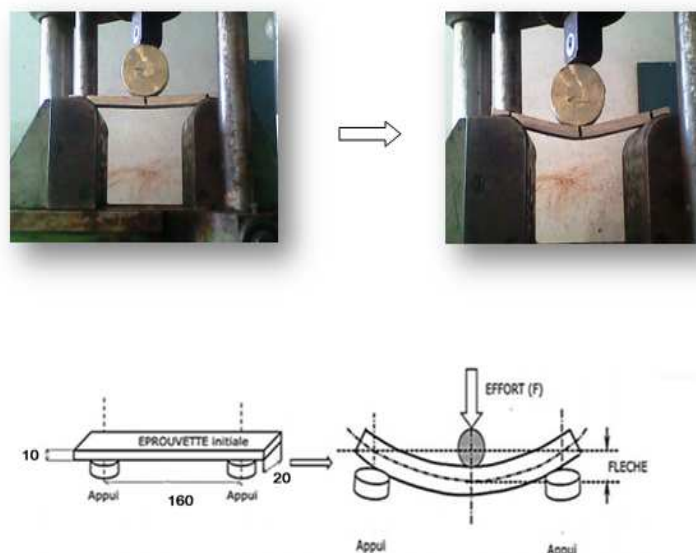
### A-3-1 ESSAIS FLEXION TROIS POINTS (NF B 51-008)

La mesure de flexion trois points est effectuée sur une machine universelle de marque **TESTWELL**.



***Photo A.16: La machine Testwell universelle***

La machine d'essai assurant une vitesse de chargement constante : 50mm/min et qui permet de mesurer la charge exercée avec une précision de 1% au moins. On impose à une éprouvette normalisée une déformation, ou flèche, à vitesse de déformation constante et on mesure la force qu'oppose l'éprouvette à cette déformation.



***Photo A.17: La mesure de la résistance à la flexion***

# ANNEXE I

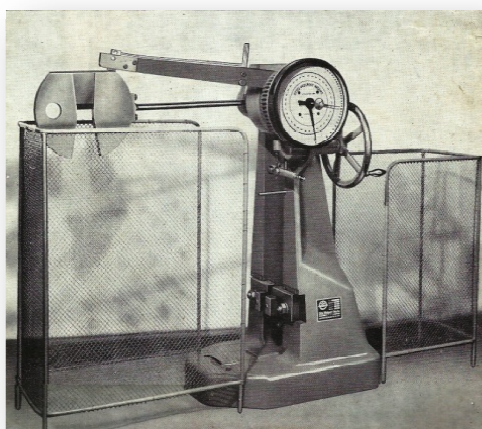
Puis, on lit la valeur de la force maximale à la rupture sur l'aiguille. Elle est exprimée en [daN]



***Photo A.18: Aiguille de la machine TESTWELL universelle***

## **A-3-2 RESTISTANCE AU CHOC (NF B 51-009)**

La mesure de résilience est effectuée sur une machine moutons-pendules universelle de marque **TYPE PW 30/15** (Puissance kpm Charpy) avec grillage de protection, au bloc technique d'Ankatso.



***Photo A.19: La machine mouton-pendule CHARPY***

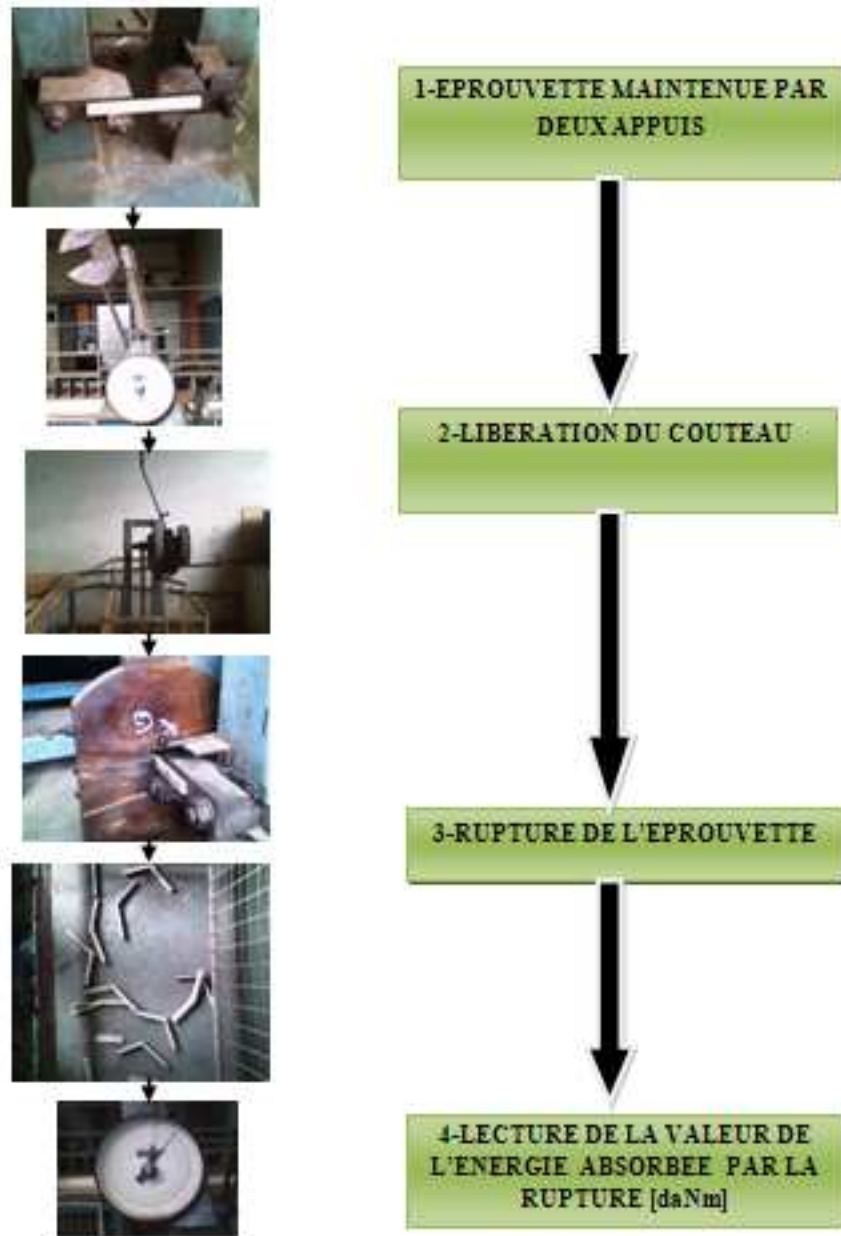
L'essai consiste à imposer un choc à l'aplomb de l'entaille, l'éprouvette étant maintenue par deux appuis sur la face opposée de façon à provoquer l'ouverture de la fissure.

Un couteau fixé sur un marteau oscille dans un plan vertical autour d'un axe O. Le couteau est écarté de la verticale, On libère le couteau. Dans sa chute en passant à la verticale, il brise l'éprouvette. On lit la valeur de l'énergie absorbée par la rupture  $W$  [daNm] et on

# ANNEXE I

divise par la section au niveau de l'entaille [ $\text{cm}^2$ ], dans notre cas la section est constante : 2cm x 1cm ce qui nous donne le facteur de résilience K.

Dans cet essai, nous avons mesuré la résistance au choc de la partie extérieure vers la partie intérieure puis de l'intérieure à l'extérieure du bambou.



***Photo A.20:** Le protocole pour la mesure de la résistance au choc*

# ANNEXE II

## A-4 LE CALIBRE A COULISSE OU PIED A COULISSE

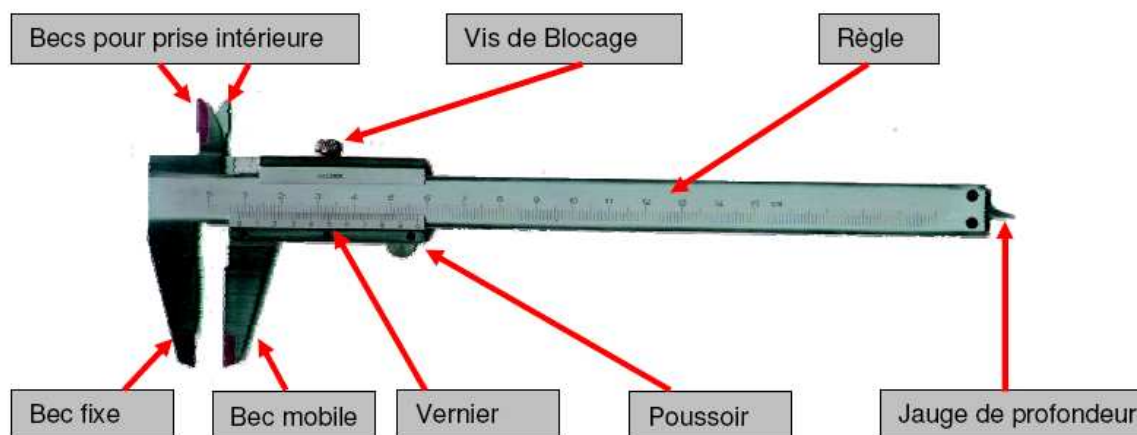
### A-4-1 FONCTION

Le calibre à coulisse est un appareil de mesure utilisé pour la mécanique de précision.

Il est composé :

- 1) D'un bec fixe prolongé par une règle graduée en millimètres
- 2) D'un bec mobile muni d'un vernier
- 3) D'un système de blocage par vis et plaquette de pression

### A-4-2 CONSTITUTION



*Photo A.21: Constitution du pied à coulisse*

### A-4-3 CARACTERISTIQUES

Le calibre à coulisse permet une mesure dont **la précision** varie avec le **type de vernier utilisé**.

Le vernier peut être au **1/10**, au **1/20**, au **1/50**. Il permet donc d'évaluer une mesure au 1/10 de mm (0,01mm), au 1/20 de mm (0,05 mm), et au **1/50 de mm (0,02 mm)**.

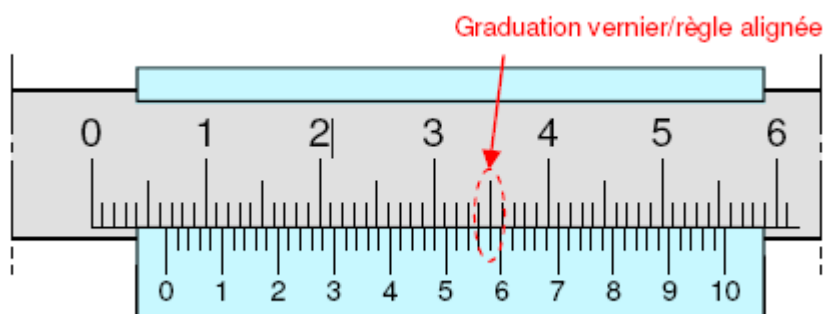
*En mécanique, le vernier au 1/50ème est le plus utilisé.*

## ANNEXE II

Nota : Les verniers au 1/10, 1/20 ou 1/50 portent leurs graduations sur une longueur de 9, 19 ou 49 mm.

- 1- Nombre de millimètres avant le 0 du vernier = **6 mm**.
- 2 - Chiffre 5 sur le vernier avant la graduation alignée = **0,5 mm**
- 3 – 4 ème graduation alignée après le chiffre 5 multiplier par 2 = **0,08 mm**

$$6 + 0,5 + 0,08 = 6,58 \text{ mm}$$



**Figure A.3** : Graduation du vernier 1/50

### **A-4-4 LECTURE DU VERNIER au 1/50**

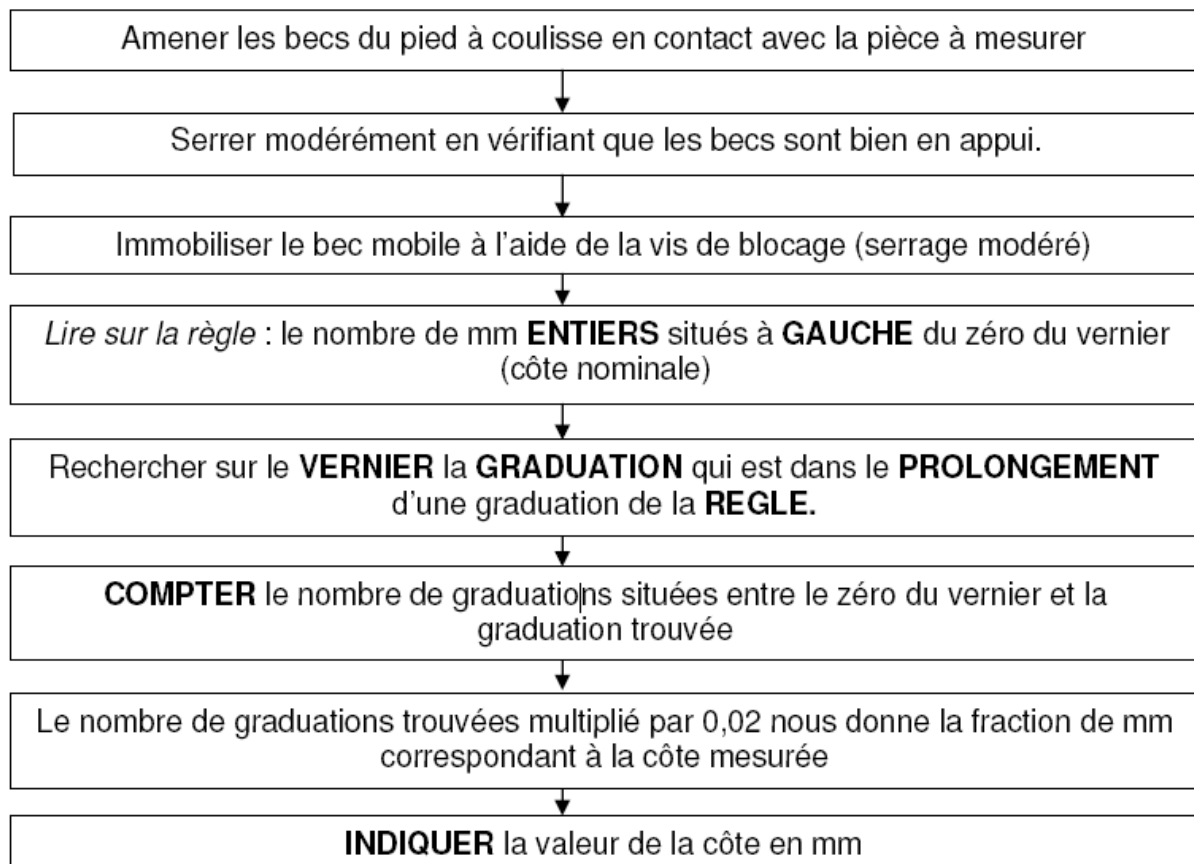
- 1- *LIRE* sur la règle le nombre entier de mm avant le zéro du vernier.
- 2- *REPERER* la graduation du vernier qui est le mieux alignée à une graduation quelconque de la règle.
- 3- *LIRE* sur le vernier, le chiffre situé avant les graduations alignées.  
Ce chiffre indique le nombre de 1/10 de millimètres.
- 4- *COMPTER* le nombre de divisions après le chiffre et le multiplier par 2.



# ANNEXE II

Sur l'exemple ci dessous :

## A-4-5 MODE OPERATOIRE D'UTILISATION DU CALIBRE A COULISSE



***Figure A.4 : Mode Opérateur d'utilisation du calibre à coulisse***



# ANNEXE III

## LIQUID PROPERTIES

PROPERTY	SPECIFICATION
Viscosity @ 25°C (Cone & Plate, poise)	2.5 - 2.7
Thixotropic index	2.3 - 2.5
Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	1.08 - 1.10
Geltime @ 25°C (2% MEKP NA2, minutes)	15 - 20
Cure time (minutes)	24 - 29
Peak Exotherm (°C)	180 - 190
Non-volatile content (%)	50 - 54
Liquid appearance	<b>pink</b>
Acid value (mg KOH/g)	6 - 13
Stability in the dark @ 25°C (months)	6

## CURING CHARACTERISTICS

UPE 1143 should be allowed to attain workshop temperature (18-25°C) before use. Drums should be rolled or mixed before use, in case any settlement of the thixotrope has taken place. The recommended catalyst is MEKP NA2 (Curox M-200) at 2% by resin mass to start the curing reaction. The ambient temperature and amount of catalyst will control the geltime of the resin.

Under no circumstances should less than 1% MEKP be used to cure unsaturated polyesters. A minimum value of 1% MEKP is recommended in industrial applications to allow for measuring inaccuracies. Curing should not be carried out below 15°C.

## POST-CURING

Curing at ambient temperatures renders laminates suitable for most applications. For optimum performance however, post-curing should be performed on the laminates. Allow for a maturing period of 24 hours. Thereafter perform standard post-curing for 3 hours at 80°C or alternatively 16 hours at 40°C.

## PHYSICAL PROPERTIES

Tensile strength (MPa)	102
Tensile modulus (MPa)	7 100
Flexural strength (MPa)	182
Flexural modulus (MPa)	7 000
Compressive strength (MPa)	219
Compressive modulus (MPa)	9 300
Water absorption after 7 days (mg)	56

# ANNEXE IV

Catalysts & Initiators

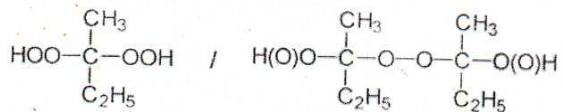
## Technical Data Sheet

## Thermosets

Ketone peroxides (Ambient temperature)

### CUROX® M-200

Methyl ethyl ketone peroxide  
CAS#1338-23-4  
Liquid mixture



#### Description:

Colourless, mobile liquid, consisting of peroxides based on methyl ethyl ketone, essentially desensitised with phthalate plasticiser. This ketone peroxide is used as an initiator (radical source) in the curing of unsaturated polyester resins. Main application: curing of moulded parts at ambient temperature in combination with cobalt accelerators.

#### Technical Data:

Appearance ..... colourless liquid  
Active oxygen ..... ca. 8.8 – 9.4% w/w  
De-sensitising agent ..... phthalate  
Density at 20°C ..... ca. 1.1 g/cm<sup>3</sup>  
Viscosity at 20°C ..... ca. 30 mPa·s  
Miscibility ..... immiscible with water, soluble in phthalates  
Critical temperature (SADT) ..... ca. 60°C  
Cold storage stability ..... to below -25°C  
Recommended storage temperature ..... below 30°C  
Maintenance of activity at 25°C ..... min. 6 months

#### Application:

**POLYESTER CURING:** Standard curing agent for all UP resin types at ambient temperature in combination with cobalt accelerators. Especially suitable for resins based on ortho- and isophthalic acid respectively. Standard dosage level: 1-3% as supplied, with 0.2-2% of a 1% cobalt solution.

"Shelf life" (gel time of resin + peroxide) usually only a few hours, depending on temperature and resin type. "Pot life" (gel time of resin + peroxide + accelerator) relatively short, but may be prolonged by adding inhibitor TC-510. Thus, the mould release factor ( $f_{MR} = t_{MR}/t_{gel}$ ) can be improved considerably.

**CURING PERFORMANCE:** Moderate evolution of heat. Relatively long mould release time, moderate mould release factors. Temperatures below 20°C prolong curing times considerably, alternatively cobalt / amine accelerators should then be used.

**PROCESSING METHODS:** Particularly hand lay-up, spray lay-up, centrifugal casting, filament winding, casting of resins, and surface coatings (putties, fillers, gelcoats and topcoats).

**SPRAY EQUIPMENT:** Use spray equipment in accordance with manufacturer's instructions. Ensure all safety devices are operational. Do not clear gun by spraying MEKP into the air.

All information is given in good faith, but without warranty, since the conditions of use are outside our control. Verification by the user is recommended. Freedom from patent restrictions cannot be assumed.

Page 1 of 2



Titre du mémoire : **«Contribution à l'étude et à la valorisation de l'espèce du bambou « dendrocalamus giganteus » ou « volo mavo » et de l'espèce « dendrocalamus asper » ou « volobe ambivahitra »**

Nombre de pages : 120

Nombre de figures : 35

Nombre de tableaux : 21

Nombre des photos : 51

### **RESUME**

*Ce mémoire de fin d'études a pour but d'étudier les propriétés physiques et mécaniques de l'espèce du bambou « dendrocalamus giganteus » ou « volobe mavo » et de l'espèce « dendrocalamus asper » ou « volobe ambivahitra » et de fabriquer des matériaux de constructions comme les planchers, les parquets, les contreplaqués et les lamellés collés à partir des deux espèces de bambou.*

*Les résultats nous montrent que ces deux espèces de bambou peuvent bien se concurrencer avec les types de bois dans le domaine de la construction et l'architecture. L'espèce dendrocalamus asper présente la meilleure qualité que le dendrocalamus giganteus*

*La résine polyester insaturé est utilisée pour l'assemblage des pièces en bambou, l'amélioration de la résistance mécanique et pour le traitement contre les agents extérieurs. Les matériaux issus du bambou sont des matériaux de produit de qualité.*

### **ABSTRACT**

*The purpose of this thesis is to study the physicals and mechanicals properties of the species "dendrocalamus giganteus" or "volobe mavo" and the species "dendrocalamus asper" or "volobe ambivahitra" and to manufacture building materials, for example the floor, the parquet floors, the plywood and lamellate-stuck from two species of bamboo.*

*The results show us that these two species of bamboo can be well competed with the types of wood in the field of construction and architecture. The species dendrocalamus asper has best quality than the dendrocalamus giganteus*

*The unsaturated polyester resin is used for assembling pieces in bamboo, for improving mechanical resistance and for the treatment against external agents. The materials resulting from the bamboo are materials of product of quality.*

### **MOTS CLES**

*Bambou, dendrocalamus giganteus, dendrocalamus asper, chaume, entrenœud, résine, propriétés physiques, propriété mécaniques.*

**Auteur** : Monsieur RAKOTOMANANA Niandry Maminirina

**Adresse** : Lot II D 57 A Manjakaray – 101 Antananarivo

**Tél** : (261) 33 07 423 81

**Adresse mail** : andrirakotomanana@gmail.com

**Encadreur** : Docteur RAKOTOSAONA Rijalalaina

**Rapporteur** : Professeur ANDRIANARY Phillipe