HAL
open science

# Modélisation du comportement au séchage des contreplaqués collés à l'état vert

Valentin Makomra

## To cite this version:

Valentin Makomra. Modélisation du comportement au séchage des contreplaqués collés à l'état vert. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université de Bordeaux; École Nationale Supérieure Polytechnique (Yaoundé), 2020. Français. NNT : 2020BORD0008 . tel-02869585

**HAL Id: tel-02869585**

**https://theses.hal.science/tel-02869585**

Submitted on 16 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE EN COTUTELLE PRÉSENTÉE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

# DOCTEUR DE

# L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

# ET DE L'UNIVERSITÉ DE YAOUNDE 1

ÉCOLE DOCTORALE : SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR (SPI)

ÉCOLE DOCTORALE : SCIENCES, TECHNOLOGIE ET GEOSCIENCES (STG)

SPÉCIALITÉ MECANIQUE

Par Valentin MAKOMRA

# MODÉLISATION DU COMPORTEMENT AU SÉCHAGE DES CONTREPLAQUÉS COLLÉS A L'ÉTAT VERT

Sous la direction de Jean-Luc BATTAGLIA
et de Louis Max AYINA OHANDJA

Soutenue le 27 Janvier 2020

Membres du jury :

| | | |
|---|---|---|
| M. DUBOIS Frédéric | Professeur, Université de Limoges | Président |
| Mme CARE Sabine | Directeur de Recherche IFSTTAR | Rapporteur |
| M LEKLOU Ali-Nordine | Professeur, Université de Nantes | Rapporteur |
| Mme BARDET Sandrine | MCF-HDR, Université de Montpellier | Examinateur |
| M. BATTAGLIA Jean Luc | Professeur, Université de Bordeaux | Examinateur |
| M. AYINA OHANDJA Louis Max | Professeur, Université de Yaoundé1 | Examinateur |
| M. POMMIER Régis | CR –HDR, Université de Bordeaux | Examinateur |
| M. OUM LISSOUCK René | CC, Université de Yaoundé1 | Examinateur |
| M. BREYSSE Denys | Professeur, Université de Bordeaux | Invité |
| M. TAILLANDIER Franck | CR -HDR, INRAE Aix en Provence-Toulouse | Invité |
| M. DENAUD Louis | MCF-HDR, LaBoMaP cluny | Invité |

## Titre : Modélisation du comportement au séchage des contreplaqués collés à l'état vert

**Résumé** : Les forêts du Bassin du Congo constituent un trésor essentiel pour la survie de l'humanité. Toutefois, elles font l'objet d'une mauvaise gestion du fait de la coupe intensive et très sélective d'un nombre limité d'essences. L'objectif de cette thèse est de développer des panneaux de contreplaqué collés à l'état vert de nouvelles essences tropicales. L'élargissement du potentiel exploitable que promet cette technologie peut contribuer à une gestion forestière plus durable. Les plis de bois, séchés artificiellement avant d'être collés, subissent généralement plusieurs dommages (fissures, déformations), limitant l'utilisation de ces espèces. La solution proposée est de les coller à l'état vert à l'aide d'un adhésif polyuréthane (Collano RP 2554) avant de les sécher. A cet effet, une analyse multicritère a permis de hiérarchiser les choix d'essences intéressantes pour être exploitées et valorisées. Une modélisation numérique de contreplaqué à trois plis collé à l'état vert et séché dans les conditions atmosphériques de l'essence Bété (*Mansonia altissima*) est effectuée, puis validée expérimentalement. Ceci a permis de mieux analyser et comprendre les divers phénomènes multi physiques, et d'optimiser le séchage. Nous nous sommes dirigés vers le séchage sous vide avec des cycles de séchage/humidification, pour relaxer les contraintes induites par les retraits anisotropiques. Quatre essences originales ont fait l'objet de mise en œuvre et de caractérisation normalisée. Les contreplaqués obtenus présentent des résultats en tous points satisfaisants. Les résultats les plus significatifs sont pour les essences de Bété et Dabema qui peuvent maintenant être valorisées industriellement grâce à cette technologie.

**Mots-clés** : Contreplaqués, Etude multicritère, Bois vert, modèles hygromécaniques du bois, séchage sous vide.

---

## Title : Modelization of green-glued plywood behaviour in drying process

**Abstract** : The forests of the Congo Basin constitute an essential treasure for the well-being of humanity. However, they are poorly managed because of the intensive and highly selective cutting of a limited number of species. The objective of this thesis is to develop plywood panels of new tropical species glued in the green state. The expanding potential promises by that technology could contribute to a more sustainable management. The wood veneers artificially dried before gluying for manufacture of plywood cause several damages (cracks, deformations), limiting the use of many species. The suggested solution is to glue them in the green state using a polyurethane adhesive (Collano RP 2554) before drying, while holding them together by assembly. In this perspective, a multi-criteria analysis made it possible to prioritize the choices of interesting species to be exploited and valorized. A numerical modeling of the plywood of Bété (*Mansonia altissima*), made of three layers of veneer, glued in the green state and dried under atmospheric conditions, is carried out and validated experimentally. This allowed to better analyze and understand the various multi-physical phenomena and optimize drying. The development of this work was made with vacuum drying technology, with drying/humidification cycles to relax the stresses induced by anisotropic withdrawals. Four original species were the subject of implementation and standardized characterization. The plywood obtained show satisfactory results in all respects. The most significant results are for the species of Bete and Dabema which can now be valued industrially by this new technology.

**Keywords**: Plywood, multi-criteria study, Green wood, hydromechanical drying models of wood, vacuum drying.

---

**I2M - UMR 5295 – 351 Cours de la libération 33400 Talence / ENSP-LMM- 8390 Yaoundé**

# REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse en cotutelle entre l'Université de Yaoundé1 et l'université de Bordeaux représente l'aboutissement de réflexions menées collectivement et n'aurait pu exister sans la participation d'un grand nombre de personnes, laboratoires, institutions et entreprises.

Merci au Pr Louis Max Ayina Ohandja qui m'a ouvert les portes de la recherche et m'a fait confiance pour la suite de mes travaux en thèse.

Merci aux responsables de l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M) de Bordeaux et du Laboratoire de Mécanique et Matériaux (LMM) de l'ENSP de Yaoundé1 où j'ai effectué mes travaux de thèse.

Merci au Ministère des Forêts et de La Faune, au Ministère de la recherche scientifique pour avoir autorisé la coupe et le transport des billons des concessions forestières du Cameroun vers les laboratoires.

Merci à l'entreprise ROUGIER SA qui a assuré le transport des billons de leurs concessions forestières du Cameroun vers les laboratoires en France.

Merci à Louis Denaud et toute son équipe, pour m'avoir accueilli au sein du LaBoMaP Cluny où j'ai effectué la majeure partie de la phase expérimentale de mes travaux.

Un grand merci à Denys Breysse, Louis Max Ayina Ohandja, Régis Pommier et René Oum Lissouck, qui m'ont encadré tout au long de cette thèse, pour leur disponibilité et leur savoir-faire.

Merci à Jean-Luc Battaglia qui a accepté de poursuivre la direction de cette thèse.

Merci à Phan Ngoc Anh pour son aide sur la simulation numérique et à Frank Taillandier sur l'analyse multicritère.

J'exprime toute ma reconnaissance à Sabine Carré et Ali-Nordine Leklou qui ont accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Merci pour tous les échanges constructifs que l'on a pu avoir.

Merci aux membres du jury Sandrine Bardet et Frédéric Dubois pour l'intérêt porté à ces travaux de thèse.

Merci à tous les membres du laboratoire I2M pour leur sympathie et leurs nombreux services rendus.

Merci à Guillaume Garbay, Gérard Elbez, Bernard Solbes, Philippe Taris, Sylvain Mateo et Raoul Adjovi Loko pour leurs conseils et assistances techniques qui m'ont permis de réaliser les expérimentations effectuées au sein du laboratoire I2M de l'Université de Bordeaux.

Merci à l'Institut Carnot ARTS et AMVALOR d'avoir accepté le démarrage de mon post doctorat avant la date de soutenance, me permettant de finaliser ma thèse dans de bonnes conditions.

Merci à tous les membres du Laboratoire de Mécanique et Matériaux de École Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé pour les différents échanges constructifs.

Merci aux Directeurs de l'ENSTP de Yaoundé et de l'Annexe de Buea pour leur appui à la réalisation de cette œuvre.

Merci à toute l'équipe de l'ENSTP/Annexe de Buea pour leurs mots encourageants pendant toutes ces périodes de thèse.

Merci à Jeremy Barboure pour son assistance pendant la rédaction de cette thèse.

Merci à tous les frères et sœurs dans le Seigneur qui m'ont porté dans leurs prières durant tout le temps de ces travaux.

Merci aux fidèles des Paroisses EFLC de Buea et EEL33 de Pessac et à Françoise Pourcher pour leur assistance et leur soutien.

Merci à ma belle famille et en particulier à mon feu beau père Dama qui n'a cessé de m'encourager dans ces travaux de recherche. Tes derniers mots resteront gravés dans ma mémoire.

Merci à la grande famille Makomra qui m'a accompagné depuis mon enfance et qui continue encore à beaucoup m'apporter. Ce travail vous est dédié.

Enfin, merci à toi Adèle, ma tendre épouse et mes enfants Elie Yvan et Yann Othniel pour les bons moments que l'on a vécu ensemble, et pour ceux que l'on passera dans le futur. Vous m'avez apporté beaucoup de soutien par vos encouragements, sans vous je n'aurais pas pu terminer ce travail vu les conditions difficiles dans lesquelles nous nous trouvions.

Que toute la gloire revienne au Seigneur !

# SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS ..... v

LISTE DES FIGURES ..... vii

LISTE DES TABLEAUX ..... x

INTRODUCTION GENERALE ..... 1

CHAPITRE 1 : CONTEXTE ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE ..... 7

*Introduction* ..... *9*

*1.1 Gestion des forêts du Bassin du Congo* ..... *9*

*1.2 Présentation du matériau contreplaqué* ..... *13*

*1.3 Approches de valorisation des essences de bois en contreplaqués : état de l'art* ..... *20*

*Conclusion* ..... *26*

CHAPITRE 2 : CHOIX MULTI CRITERES DES ESSENCES DE BOIS POUR LA FABRICATION DES CONTREPLAQUÉS ..... 27

*Introduction* ..... *29*

*2.1 Identification et justification des critères* ..... *29*

*2.2 Présentation de l'ensemble des choix et de la structure de préférence des essences de bois.* ..... *36*

*2.3 Méthodologie* ..... *47*

*2.4 Résultats* ..... *54*

*2.5 Discussions* ..... *65*

*Conclusion* ..... *67*

CHAPITRE 3 : MODELISATION ET VALIDATION EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES CONTREPLAQUÉS AU COURS DU SECHAGE ..... 69

*Introduction* ..... *71*

*3.1 Modélisation du comportement hygromécanique du CP au cours du séchage* ..... *72*

*3.2 Implémentation du modèle dans le code cast3m* ..... *83*

*3.3 Identification et détermination expérimentale des paramètres du modèle rhéologique global* ..... *85*

*3.4 Validation du modèle numérique* ..... *92*

*3.5 Discussion* ..... *105*

*Conclusion* ..... *106*

CHAPITRE 4 : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DU SÉCHAGE SOUS VIDE DES CONTREPLAQUÉS ..... 107

*Introduction* ..... *109*

*4.1 Mécanisme du séchage sous vide* ..... *109*

*4.2 Présentation du séchoir sous vide* ..... *110*

*4.3 Choix et caractéristiques des échantillons* ..... *111*

*4.4 Séchage des CP sous vide continu sans cycle de séchage/humidification* ..... *114*

*4.5 Résultats* ..... *114*

*4.6 Discussion* ..... *116*

*4.7 Séchage sous vide continu des contreplaqués avec application d'un cycle de séchage/réhumidification* ..... *117*

*4.8 Caractérisation mécanique des panneaux* ..... *121*

*Conclusion* ..... *121*

CONCLUSION GENERALE ..... 128

BIBLIOGRAPHIE ..... 133

ANNEXES ..... 143

# LISTE DES ABREVIATIONS

**ABOVE** : Aboutage du Bois Vert

**ADM** : Aide à la Décision Multicritère

**AHP** : Analytic Hierarchy Process (Analyse Multicritère Hiérarchique)

**ANAFOR** : Agence Nationale d'Appui au Développement Forestier

**BC** : Bassin du Congo

**BLC** : Bois Lamellé Collé

**CIRAD** : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

**CITES** : Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages

**CNRS** : Centre National de la Recherche Scientifique

**COMIFAC** : Commission des Forêts d'Afrique centrale

**CP** : Contreplaqué

**CTBA** : Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (FCBA)

**DME** : Diamètre Minimum d'Exploitabilité

**ELECTRE** : Elimination et Choix Traduisant la Réalité

**ETWP** : Engineered Tropical Wood Product (Produit d'Ingénierie du Bois Tropical)

**FAO** : Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)

**GCE** : Génie Civil Environnement

**I2M** : Institut de Mécanique et d'Ingénierie

**ITTO** : International Tropical Timber Organization

**IUCN** : International Union for Conservation of Nature (Union Internationale pour la Conservation de la Nature)

**LMM** : Laboratoire de Mécaniques et Matériaux

**LVL** : Laminated Veneer Lumber

**MAUT** : Multi Attribute Utility Theory (Théorie de l'Utilité Multi-Attribut)

**MINFOF** : Ministère des Forêts et de la Faune

**MOE** : Module d'Elasticité

**MOR** : Module de Rupture en Flexion

**MUF** : Mélamine – Urée - Formol

**OFAC** : Observatoire des Forêts d'Afrique Centrale

**OIBT** : Organisation International des bois Tropicaux

**ONG** : Organisation Non Gouvernementale

**PAF** : Plans d'Aménagement Forestier

**PF** : Phénol Formaldéhyde

**PFBC** : Partenariat pour les Forêts du Bassin du Congo

**PFNL** : Produits Forestiers Non Ligneux

**PIB** : Produit Intérieur Brut

**PROTA** : Plant Resources of Tropical Africa (Ressources Végétales de l'Afrique Tropicale)

**PU** : Polyuréthane

**RDC** : République Démocratique du Congo

**REDD** : Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (Réduction des Emissions

**RPF** : Résorcine – Phénol – Formaldéhyde

**SNCOCAM** : Société Nouvelle de Contreplaqués du Cameroun

**ALPICAM** : Alpi Pietro Cameroun Sarl

**PLACAM** : Placages Du Cameroun

**UF** : Urée-Formol

**UFA** : Unité Forestière d'Aménagement

# LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Cueillette (Dimako/Cameroun) ..... 10

Figure 1.2 : Scierie à chaîne portable (RCA). © FAO/M. Vandenhaute ..... 10

Figure 1.3 : données statistiques des productions annuelles des grumes CIFOR (2014) ..... 11

Figure 1.4 : Productions annuelles évaluées par essence en 2008 et 2014 sur Bassin du Congo ($m^3$/an)Source: OFAC ..... 12

Figure 1.5 : Panneau contreplaqué okoumé intérieur-extérieur ..... 13

Figure 1.6 : Processus de fabrication traditionnelle des Contreplaqués ..... 16

Figure 1.7 : Présentation du procédé de déroulage de bois - Formation de fissures sur la face tendue (Navi et al, 2007, A. Dupleix) ..... 17

Figure 1.8 : Représentation des techniques de moulage sous vide ..... 17

Figure 1.9 : Représentation des techniques de moulage sous vide ..... 18

Figure 2.1 : Structure des catégories de UICN version 3.1 (UICN, 2001). ..... 37

Figure 2. 2 : Exemple d'affectation d'une essence de bois selon ELECTRE TRI-B ..... 53

Figure 3.1 : Modèle à activation indépendante ..... 77

Figure 3.2 : Réponse du modèle de Ranta-Manaus ..... 77

Figure 3.3 : Modèle généralisé à activation indépendante ..... 78

Figure 3.4 : Modèle de à activation combinée ..... 78

Figure 3.5 : Réponse viscoélastique des modèles à activation combinée ..... 79

Figure 3.6 : Modèle de Mukuday ..... 79

Figure 3.7 : Modèle de Gril ..... 80

Figure 3.8 : Modèle rhéologique global à une dimension ..... 82

Figure 3.9 : Opération d'étuvage du Bété ..... 86

Figure 3.10 : Isotherme de désorption du Bété ..... 88

Figure 3.11 : Géométrie de l'éprouvette et sa disposition sur la machine à traction ..... 89

Figure 3.12 : Courbe contrainte/déformation relevée au cours d'un essai de traction du pli de bété dans la direction Longitudinale (a) et dans la direction Tangentielle (b). ..... 89

Figure 3.13 : Exemple de rupture d'éprouvettes de bété testées dans la direction des fibres ..... 90

Figure 3.14 : Exemple de rupture d'éprouvettes de bété testées dans la direction perpendiculaire au fil du bois ..... 90

Figure 3.15 : Exemple de spécimen. ..... 91

Figure 3.16 : Évolution de la teneur en eau au cours du séchage du CP du Bété. ..... 92

Figure 3.17 : Orientation des plis suivant les directions orthotropiques ..... 93

Figure 3.18 : Chargement hydrique et maillage imposés dans le calcul ..... 93

Figure 3.19 : Test de sensibilité de la densité du maillage après 5h de séchage ..... 94

Figure 3.20 : Test de sensibilité du pas de calcul (en seconde) du transfert hydrique ..... 94

Figure 3.21 : Test de sensibilité du pas de temps de calcul (en seconde) du transfert hydrique ..... 95

Figure 3. 22 : Influence des conditions aux limites sur le gauchissement des plis ..... 96

Figure 3.23 : Configuration antisymétrique de l'échantillon du CP. ..... 98

Figure 3.24 : Champ de déplacement du CP obtenu expérimentalement après 50 heures de séchage . 98

Figure 3.25 : Évolution de déplacement Expérimental du point P1 du CP au cours du séchage ..... 99

Figure 3.26 : Modèle rhéologique à une dimension du scénario 1 ..... 100

Figure 3.27 : Évolution de déplacement du point P1 du CP en fonction de la variation du retrait tangentiel, sans la considération de comportement viscoélastique ..... 100

Figure 3.28 : Modèle rhéologique à une dimension du scénario 2 ..... 101

Figure 3.29 : Évolution de déplacement du point P1 du CP ..... 102

Figure 3.30 : Champ de déplacement du CP (mm) obtenu numériquement après 50 heures de séchage ..... 102

Figure 3.31 : Champ de contraintes obtenu numériquement des CP à configuration asymétrique après 50 heures de séchage ..... 103

Figure 3.32 : État du CP après 50 heures de séchage ..... 103

Figure 3.33 : Evaluation numérique du champ de contraintes après 50 heures de séchage ..... 104

Figure 3.34 Évolution des contraintes dans les directions X et Y d'un point surfacique du CP. ..... 104

Figure 4.1 Vues extérieure et intérieure du Séchoir sous vide ..... 111

Figure 4 2 : Billons des différentes essences ..... 112

Figure 4.3: Etuvage des billons. ..... 112

Figure 4.4: Déroulage des billons. ..... 113

Figure 4.5: Préparation des contreplaqués : encollage des plis ..... 113

Figure 4. 6: Disposition des CP dans le séchoir ..... 114

Figure 4.7 : Evolution de la teneur en eau du CP pendant le séchage sous vide continu des essences de Dabema. ..... 115

Figure 4. 8 : CP du hêtre et du Dabéma issus du séchage sous vide à 65°C ..... 116

Figure 4. 9 : Diagrammes des contraintes hydriques en fonction du temps (Saifouni, 2014). ..... 117

Figure 4.10 : Évolution de la teneur en eau et de la température au cours du cycle de séchage/humidification sous vide continu du Bété ..... 119

Figure 4. 11 : CP du Bété, du Dabéma et de l'aningré issus du cycle séchage/humidification sous vide ..... 120

Figure 4.12 : Évolution de la teneur en eau et de la température au cours du cycle de séchage/humidification sous vide continu du Bété. ..... 120

Figure 4. 13 : CP du Bété, du Dabéma et de l'aningré issus du séchage sous vide à cycle de désorption et d'absorption ..... 121

Figure 4.14: a) Principe de l'essai de flexion 3 points b) Schéma RDM associé, T : effort tranchant, M : moment (NF EN 310) ..... 122

Figure 4. 15 : a) Principe de l'essai de flexion 4 points (NF EN 789), b) schéma RDM associé, T : effort tranchant, M : moment fléchissant ..... 123

Figure 4.16 : Détail d'un appui extérieur du bâti de flexion ASTM D3043 méthode B (Bos et al, 1997). ..... 123

Figure 4.17 : Principe de l'essai BOGUI (Bos et al, 1997) ..... 124

Figure 4.18 : éprouvettes des différentes essences pour le test de flexion à quatre points. ..... 125

Figure 4.19 : Banc d'essai de flexion 4 points ..... 126

Figure 4.20 : Exemple de courbe force / déplacement traverse selon la direction x1 des plis extérieurs au cours d'un essai de flexion quatre points de l'essence Bete. ..... 126

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Importance du secteur forestier dans les économies d'Afrique Centrale (OFAC, 2013). 10

Tableau 1.2 : Données statistiques de production des produits bois du CIFOR (2014), ..... 12

Tableau 1.3 : Données et spécification de l'aptitude au déroulage et de l'utilisation en contreplaqué de certaines essences de bois du Bassin du Congo (extrait de Tropix 7.0). ..... 22

Tableau 1.4 : caractéristiques mécaniques du bois feuillus standard à un taux d'humidité de 12% (Guitard, 1987)..... 24

Tableau 2.1 : Difficultés de collage des bois tropicaux : description et solutions (Elbez et Bend 1991, FCBA 2008; CIRAD 2011) ..... 33

Tableau 2.2 : classes d'emploi du bois en fonction des conditions d'exposition (EN 335-1, 2007)..... 35

Tableau 2.3 : Exemples d'utilisation alternative de certaines essences ligneuses dans le bassin du Congo ..... 36

Tableau 2.4 : Statut de Conservation des essences présélectionnées (IUCN, 2013)..... 38

Tableau 2.5 : Potentiel exploitable des essences présélectionnées (FAO et MINFOF, 2006). ..... 39

Tableau 2.6 : Catégorisation des essences de bois selon le potentiel de régénération naturelle après abattage (source: nos investigations)..... 40

Tableau 2.7 : Catégorisation des essences de bois selon l'aptitude au déroulage (Tropix 7.0)..... 41

Tableau 2.8 : Catégorisation des dispositions des contrefils des 82 essences présélectionnées.( (Tropix 7.0) ..... 41

Tableau 2.9 : Catégories d'aptitude au collage des 82 essences présélectionnées (CIRAD 2011). ..... 42

Tableau 2.10 : Catégories d'aptitude à la rétractabilité des 82 essences présélectionnées (CIRAD 2011)..... 43

Tableau 2.11 : Catégorisation des 82 essences présélectionnées en fonction de la valeur du module d'élasticité (CIRAD 2011). ..... 43

Tableau 2.12 : Catégorisation des 82 essences présélectionnées en fonction de leur résistance intrinsèque aux insectes (CIRAD 2011)..... 45

Tableau 2.13 : Catégorisation des 82 essences présélectionnées en fonction de leur résistance intrinsèque aux termites (CIRAD 2011)..... 45

Tableau 2.14 : Catégorisation des 82 essences présélectionnées en fonction de leur résistance intrinsèque aux champignons(CIRAD 2011). ..... 46

Tableau 2.15 : Catégorisation des 82 essences présélectionnées selon le critère d'utilisation non ligneuse (CIRAD 2011)..... 47

Tableau 2.16 : Quantification de la performance intra critère des essences de bois. ..... 50

Tableau 2.17 : Stratégies de choix des essences pour la classe d'usage 3..... 51

Tableau 2.18 : Stratégies de choix des essences pour la classe d'usage 2..... 51

Tableau 2.19 : Stratégies de choix des essences pour la classe d'usage 1 ..... 52

Tableau 2.20 : Hiérarchisation ordinale des essences de bois pour usage en classe 1 ..... 54

Tableau 2.21 : Hiérarchisation ordinale des essences de bois pour usage en classe 2 ..... 56

Tableau 2.22 : Hiérarchisation ordinale des essences de bois pour usage en classe 3 ..... 58

Tableau 2.23 : Exemples d'affectation des essences de bois aux catégories de compromis multicritère ( cas de la stratégie B (ELECTRE TRI-B) pour la classe d'usage 3) ..... 63

Tableau 2.24 : Exemple d'attribution du rang des essences de bois selon ELECTRE III, stratégie B pour la classe d'usage 3 ..... 64

Tableau 3.1 : Quelques caractéristiques physiques et mécaniques du bété et du hêtre à un taux d'humidité de 12 % (CIRAD, 2011) ..... 86

Tableau 3. 2: Résultats des essais de traction (des plis de bois) longitudinale et perpendiculaire aux fibres ..... 90

Tableau 3.3: Coefficients de diffusion et d'échange du contreplaqué ..... 92

Tableau 3.4 : Paramètres du matériau (pli de bois) utilisés dans le cadre de la simulation du comportement au séchage des CP. ..... 96

Tableau 3.5 : Résultats expérimentaux de déplacement au point P1 des échantillons au cours du séchage. ..... 99

Tableau 3.6 : Calibrage des paramètres viscoélastique des plis ..... 101

Tableau 4. 1 : Tableau récapitulatif des valeurs entrées dans le microprocesseur lors de séchage ..... 118

Tableau 4.2 : Caractéristiques élastiques du contreplaqué collé à l'état vert et séché sous vide en utilisant le dispositif de flexion 4 points ..... 127

Tableau 4.3 : Caractéristiques de rupture du contreplaqué collé à l'état vert testé selon x1 (0°) et selon x2 (90°) ..... 127

# INTRODUCTION GENERALE

A l'aube des années 90, de nombreux pays du Bassin du Congo (BC) ont adopté un cadre juridique forestier novateur afin de garantir la gestion durable des ressources forestières du point de vue de la conservation de la biodiversité et du développement de la production industrielle du bois (Pinta et al., 2004). Dans cette perspective, les sociétés d'exploitation forestière doivent préparer des Plans d'Aménagement Forestier (PAF) détaillés pour assurer un rendement à long terme et maintenir les fonctions écologiques et sociales dans les concessions forestières. Deux mesures fondamentales furent adoptées : l'obligation de créer dès 1997 une industrie du bois pour chaque Unité Forestière d'Aménagement (UFA) exploitée et l'interdiction en 1999 d'exporter sous forme de grumes certaines essences (Annexe 1.1). Malgré ces réformes importantes et le nombre croissant de PAF approuvés, de nombreuses espèces ligneuses emblématiques des forêts du Bassin du Congo, parmi des centaines exploitables, sont menacées d'épuisement à l'exemple du Wenge (*Millettia laurentii*). L'une des raisons qui expliquent cette situation concerne la stratégie formelle de préservation de la biodiversité ligneuse, qui est axée uniquement sur la promotion des mesures de contrôle de la légalité forestière (de Wasseige et al., 2010). Une alternative consiste à valoriser de manière durable les produits de la filière bois, tout en préservant les espèces en danger.

Au plan économique, la contribution de la filière bois à la formation du Produit Intérieur Brut (PIB) en Afrique Centrale est significative. Au Cameroun par exemple, elle est estimée à 6%, ce qui place cette filière au 3$^{e}$ rang économique après la production pétrolière et l'agriculture (Eba'a Atyii et al., 2013). Cette filière est majoritairement tournée vers l'exportation, dont 80% vers l'Union Européenne (Eba'a Atyii et al., 2013). Les activités d'exportation génèrent près des trois quarts du chiffre d'affaires. Les recettes d'exportation de bois transformés et de grumes constituent régulièrement la seconde source de devises de la majorité des pays du Bassin du Congo. On dénombre plusieurs dizaines d'usines de transformation du bois pour une production annuelle de bois d'environ 3000000 m$^3$. La première transformation est essentiellement dominée par le sciage, avec une production qui représente près de 1,2 million de m$^3$ en Afrique Centrale. Le principal produit de deuxième transformation est le contreplaqué dont la production annuelle est estimée à 151 400 m$^3$ et la part réservée à l'exportation représente environ 42 % (CIFOR, 2014).

Malgré la restriction relative à l'exportation des grumes et l'existence d'un marché international, le volume des exportations du contreplaqué en Afrique Centrale est très marginal au plan international. Ce qui ne permet pas de concurrencer certains pays comme la Malaisie et l'Indonésie. En effet, la production en contreplaqué des pays du Bassin du Congo représente seulement 3 % des exportations des pays producteurs de l'Organisation International des Bois Tropicaux (ATIBT, 2011). Depuis plusieurs dizaines d'années, l'okoumé (*aucoumea klaineana*) est l'espèce emblématique utilisée au Gabon pour la mise en œuvre des Contreplaqués (CP). Au

Cameroun, la production est concentrée sur l'ayous (*triplochiton scleroxylon*), l'ilomba (*pycnanthus angolensis/pycnanthus kombo*), le fromager (*ceiba pentandra/ceiba thonningii*), le lotofa (*sterculia rhinopelata*) et le sapelli (*entandrophragma cylindricum*). Au plan écologique, le sapelli et l'Okoumé (*Aucoumea Klaineana*) sont des espèces dites « vulnérables », premier stade de la menace d'extinction en forêt (IUCN, 2018). A une échelle plus locale, dans la partie camerounaise des forêts du Bassin du Congo, les essences de bois comme l'Aningré et l'Eyoung (*Aningeria altissima et Eibroma oblonga*) connaissent des ruptures fréquentes en approvisionnement, du fait d'une raréfaction progressive dans l'environnement des sites de production du contreplaqué (Djoufcak, 2012). Ce qui perturbe et affaiblit considérablement les rythmes de production.

L'Université de Bordeaux (I2M GCE) et l'Ecole Polytechnique (LMM) de Yaoundé développent conjointement depuis plusieurs années des solutions basées sur l'Ingénierie du Bois, dans la perspective de mieux valoriser la ressource ligneuse du Bassin du Congo tout en préservant des espèces surexploitées ou menacées d'épuisement en forêt. La première solution concerne le regroupement mécanique des sciages des essences du Bassin du Congo (Mvogo, 2008). L'auteur propose des substituts mécaniques aux sciages d'essences les plus exploitées et les organise en quatre classes de résistance de type Eurocode 5. Les résultats obtenus ont permis d'élargir le potentiel des ressources valorisables tout en garantissant la résistance mécanique des essences étudiées. Toutefois, la substitution mécanique s'est limitée au module d'élasticité (MOE) et au module de rupture en flexion (MOR), sans prendre en compte d'autres aspects importants des essences tels que : leur disponibilité, leur régénération, leur collabilité, leur usage comme Produits Forestier Non Ligneuse (PFNL), etc… susceptibles d'affecter l'aptitude à l'industrialisation ou à l'usage.

Par la suite, Oum (2014), a investigué la valorisation en grandeur d'emploi des espèces en bois lamellés collées à l'état vert. L'auteur a développé un outil permettant d'organiser la sélection des essences en trois familles (vert/orange/rouge) selon des critères de développement durable (écologiques, économiques et sociaux) (Oum, 2014 ; Oum et al., 2018). Il a ensuite identifié la proximité technologique des différentes essences de bois dans le but de définir des substituts technologiques aux essences menacées d'épuisement (Oum et al., 2016). Dans une logique de valorisation industrielle au sein de bois lamellés collés en grandeur d'emploi, les essences sélectionnées ont été caractérisées avec succès. Ce travail pose les bases d'une conception stratégique et durable de la filière Bois Lamellé-Collé (BLC) dans les pays du Bassin du Congo. De plus, il permet d'élargir le potentiel de valorisation des espèces ligneuses traditionnellement utilisées en BLC tout en préservant celles qui sont en danger d'épuisement. Toutefois, ces produits

sont généralement fabriqués sur mesure et la production doit être absorbée par le marché en commande régulière (Martin, 2006). En Guyane française par exemple, la production minimale permettant de garantir la rentabilité du BLC est de 6000 $m^3$ par an (Bourreau, 2011). Dans le cas des pays du Bassin du Congo, la production locale reste marginale du fait d'une faible demande. Le savoir-faire doit être certifié par une accréditation pour la réalisation des éléments de plus de 6 m de longueur. Cette accréditation représente un coût élevé et difficilement amortissable par une petite entreprise (Martin, 2006). La technique doit s'appuyer sur des normes et une assurance qualité contraignante pour le contrôle des paramètres (types de colles, temps de séchage, température, humidité du bois, type de bois, compatibilité des bois, acidité, influence des extractibles, etc.). Ces diverses contraintes peuvent contribuer à réduire significativement l'implication des entreprises locales pour le développement du BLC.

Cette thèse se situe dans la continuité des travaux précédents. Le produit d'ingénierie du bois, objet de ce travail est le contreplaqué. Au plan social, il présente un fort potentiel d'employabilité permanente et procure des emplois stables. Une usine de contreplaqué en Afrique Centrale concentre trois à quatre fois plus d'emplois que dans une scierie industrielle. Sur le plan économique, l'existence des marchés internationaux et locaux permet une commercialisation régulière de la production des contreplaqués depuis de nombreuses années. Au plan technique, ces produits connaissent une très large gamme d'utilisation : ameublement, coques de bateaux, structure (rôle de contreventement), second œuvre. Les conditions d'emploi sont également diversifiées : milieu sec, milieu semi-humide ou milieu humide. De plus, le contreplaqué est crédité d'un savoir-faire local relativement maîtrisé. Toutefois, l'industrie locale des contreplaqués en Afrique Centrale se heurte à une contrainte majeure : le séchage difficile des plis de bois qui engendre de nombreuses pertes de matière et limite la rentabilité de la production. En effet, bien que certaines espèces de bois durs comme le lotofa soient créditées d'une bonne aptitude au déroulage (condition rédhibitoire d'obtention des plis de bois), leur nervosité et la présence de défauts caractéristiques comme le contrefil peuvent contrarier fortement leur comportement au séchage (CIRAD, 2011 ; Gérard, 1999). Ce qui se traduit alors par la présence des fissures et des possibles déformations sévères des plis.

Les marchés nationaux et internationaux sont demandeurs de placages et de contreplaqués peu coûteux et sans défauts. L'apparition des fentes ou des gerces pendant le séchage déprécie la qualité des plis et par ricochet celle des contreplaqués, ce qui peut contribuer à réduire davantage l'éligibilité et la sélection de plusieurs essences de bois. De plus, la stratégie de production a consisté depuis de nombreuses années à utiliser les essences « connues » de l'industrie, même quand les contreplaqués ne sont pas destinés à des usages de très haute valeur commerciale. Cela

traduit un déficit local d'investigations des essences de substitution. La dégradation post séchage des plis, du fait de leur manutention, constitue également une source de perte de matière. L'une des solutions envisageables est leur encollage à l'état vert et le séchage sous vide de ces contreplaqués collés à l'état vert permet un gain de 4 à 5 fois plus de temps qu'un séchage à air chaud climatisé et d'obtenir très sensiblement une bonne qualité finale dans des conditions économiquement viables (Aléon et al., 1991).

Les résultats des travaux de thèse de Lavalette (2013) ont montré qu'il est possible de développer des contreplaqués à l'état vert pour la construction navale en utilisant des espèces résineuses comme le pin maritime (*pinus pinaster*). La technologie du moulage sous vide a été utilisée avec succès. La validation des paramètres de collage des plis de bois a constitué une étape importante de ce travail. Toutefois, cette approche est centrée sur une espèce ligneuse tempérée. De plus, des fissures ont été observées à l'issue de ce procédé sur les faces des contreplaqués et jugées non préjudiciables pour l'industrie navale. Cette tolérance n'est a priori pas transposable aux contreplaqués destinés à l'industrie de la construction en bois, du fait des qualités esthétiques et visuelles généralement recherchées en surface dans les marchés internationaux. La prévision du comportement physique et mécanique des contreplaqués à l'état vert constitue donc un enjeu majeur.

La question fondamentale de ces travaux de thèse est celle de savoir : comment contribuer à une meilleure valorisation des essences du Bassin du Congo en Contreplaqués tout en assurant la durabilité des prélèvements ? Deux solutions sont envisagées : - sélectionner des nouvelles essences potentiellement adaptées à la fabrication des CP et proposer un process de séchage sous vide adapté aux CP collés à l'état vert avec des cycles de séchage/humidification. Pour atteindre ces objectifs, cette thèse est organisée autour de quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, le contexte général de l'étude occupe une place importante. Il met en relief la gestion des forêts du Bassin du Congo dans ses aspects économique et technique en relation avec la transformation du bois. La présentation du contreplaqué est étudiée, puis on rappelle les principaux résultats relatifs aux investigations de ce produit en accordant une attention aux bois tropicaux.

Le Chapitre 2 concerne l'identification des espèces ligneuses tropicales adaptées à l'industrialisation raisonnée des contreplaqués en Afrique Centrale. Les incertitudes des propriétés matérielles seront prises en compte, ainsi que les différentes classes d'emploi (milieu sec, milieu semi-humide, milieu humide). Puis une analyse multicritère du choix des essences est conduite.

Elle permettra de consolider les bases des données des essences de bois pour la fabrication des contreplaqués en tenant compte des aspects écologique, économique, technologique et social.

Le chapitre 3 a porté sur l'élaboration du modèle numérique du séchage du CP dans les conditions atmosphériques. Au préalable, les modèles existants sont présentés et analysés. Un modèle constitutif de type élasto-viscoélastique est proposé. Il prend en compte les phénomènes de diffusion hydrique, la rétractibilité différentielle des plis, l'évolution temporelle des grandeurs mécaniques et les aspects mécanosorptifs. Certains paramètres physico-mécaniques clés comme les coefficients de diffusion hydrique et le point de saturation des fibres seront évalués expérimentalement dans le but d'alimenter rigoureusement les principaux inputs du modèle. La dernière partie de ce chapitre présente la validation du modèle à partir des résultats expérimentaux. Ce qui permettra d'évaluer les contraintes et les déformations au cours du séchage des CP dans les conditions atmosphériques.

Le dernier chapitre de la thèse est opérationnel. Il permet à partir de la connaissance de l'évolution des contraintes et des déformations des CP au cours du séchage, de proposer des méthodes expérimentales de séchage sous vide continu avec un cycle séchage/humidification dans le but d'améliorer la qualité du produit. Ce cycle sera piloté en faisant varier la température, de manière à obtenir une intégrité matérielle et une stabilité géométrique intéressante.

A l'issue de ce travail, nous montrerons qu'il est possible de formaliser une solution efficace, aux plans technologique et économique, de valorisation des bois tropicaux du Bassin du Congo en contreplaqué basée sur le collage à l'état vert et le séchage sous vide.

# CHAPITRE 1 : CONTEXTE ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction ..... 9

1.1 Gestion des forêts du Bassin du Congo ..... 9

1.2 Présentation du matériau contreplaqué ..... 13

1.3 Approches de valorisation des essences de bois en contreplaqués : état de l'art ..... 20

Conclusion ..... 26

# Introduction

Ce chapitre présente un état de l'art sur les problématiques des CP issus des bois du Bassin du Congo (BC). L'état des forêts est décrit, en mettant en exergue leur importance sur le plan économique, environnemental et sur les produits issus de leur exploitation par les industriels. Le principal produit de deuxième transformation est le CP. Aujourd'hui les prélèvements sont très sélectifs alors que le BC possède de nombreuses essences d'intérêts, abondantes et non exploitées. Les différents procédés de fabrication, les problèmes techniques de fabrication des CP et les propriétés mécaniques des CP sont présentés.

## 1.1 Gestion des forêts du Bassin du Congo

La gestion des forêts du BC est déclinée en quatre points, à savoir : l'importance des forêts, l'exploitation des essences de bois, la transformation de la ressource ligneuse, les aspects économiques et techniques du développement des contreplaqués.

### 1.1.1 Importance des forets

Le BC s'étend sur plusieurs pays d'Afrique Centrale parmi lesquels le Cameroun, la République Centrafricaine, la Guinée Équatoriale, la République Démocratique du Congo (RDC) et le Gabon. Considéré comme le deuxième poumon du monde après l'Amazonie, le BC occupe 26% de la surface des forêts tropicales de la planète. Il abrite une riche biodiversité et la forêt y couvre environ 228 millions d'hectares. On y dénombre également plus de 500 espèces ligneuses (FAO, 2006). Les forêts du Bassin du Congo constituent un trésor essentiel pour la survie de l'humanité (OFAC, 2013). En effet, ces dernières génèrent l'oxygène qui contribue à la qualité de l'air que nous respirons, jouent un rôle important dans la stabilité climatique, la régulation des précipitations locales et régionales et jouent également un rôle déterminant dans le ralentissement du réchauffement climatique en stockant du carbone.

Les ressources forestières du BC constituent un des moteurs de l'activité économique sous régionale. Elles représentent une part importante du Produit Intérieur Brut (PIB) et contribuent à la création de nombreux emplois au sein de la population active. Le tableau 1.1 présente quelques données économiques et sociales liées à ce secteur économique.

*Tableau 1.1 : Importance du secteur forestier dans les économies d'Afrique Centrale (OFAC, 2013)*

| Pays | PIB | Recettes fiscales | | Emploi Secteur formel | Emploi Secteur informel |
|---|---|---|---|---|---|
| | | en FCFA | en EURO | | |
| Cameroun | 6% | ≅ 41 Milliards | ≅ 62,5 Millions | 13 000 | 150 000 |
| RCA | 6,3% | 41% des recettes d'exportation | | 2ème pourvoyeur après l'Etat | |
| Congo | 5,6% | 6,6 Milliards | ≅ 10,05 Millions | 4 000 | |
| Gabon | 4,3% | 20,5 Milliards | ≅ 31,25 Millions | 2ème pourvoyeur après l'Etat | |
| RDC | 1% | 4,6 Milliards | ≅ 7 Millions | 15 000 | |
| Guinée Equatoriale | 0,22% | | | 2 000 | |

Ce secteur constitue le premier employeur privé et une source importante d'activités économiques non comptabilisables. Au Gabon par exemple, il emploie 28% de la population active pour une contribution de 4, 3% à la formation du PIB (Devers, 2006).

Ces forêts servent également de réservoir pour l'alimentation des populations riveraines et pour la pharmacopée traditionnelle. Plus de 75 millions d'habitants vivent dans les pays du Bassin du Congo, dont 65% dans les centres urbains proches de ces domaines forestiers. Les ressources de la forêt assurent leur survie (Figures 1.1 et 1.2) tout en générant des revenus en dépit des technologies d'exploitation qui demeurent rudimentaires (Navi et al., 2011).

*Figure 1.1 : Cueillette (Dimako/Cameroun)*

*Figure 1.2 : Scierie à chaîne portable (RCA). © FAO/M. Vandenhaute*

## 1.1.2 Exploitation des essences du Bassin du Congo

Au cours des quinze dernières années, le secteur forestier du BC a produit en moyenne plus de dix millions de $m^3$ de grumes par an. Le Gabon a considérablement réduit son exportation de grumes en passant de 4,22 millions de $m^3$ en 2001 à moins de 1,71 million de $m^3$ en 2012 en raison de la politique de la transformation locale des ressources en bois récemment mise en place par les autorités du pays. Par contre, la RDC est passée de 0,38 à 4,5 millions de $m^3$ de grumes. La production sur l'ensemble du BC reste néanmoins globalement décroissante depuis 2006 en passant

de 13,828 millions de $m^3$ à 11,87 millions de $m^3$ en 2012. Ce niveau de production place le BC en dernière position parmi les 3 grands bassins forestiers producteurs de bois tropicaux (Bassin du Congo, Amazonie et Mékong). La contribution du BC représente seulement 3% de la production de grumes de bois tropicaux dans le monde et 0,4% de la production mondiale de bois rond. Elle produit cependant 80 % des bois africains. La figure 1.3 présente les niveaux de production annuelle des grumes du BC.

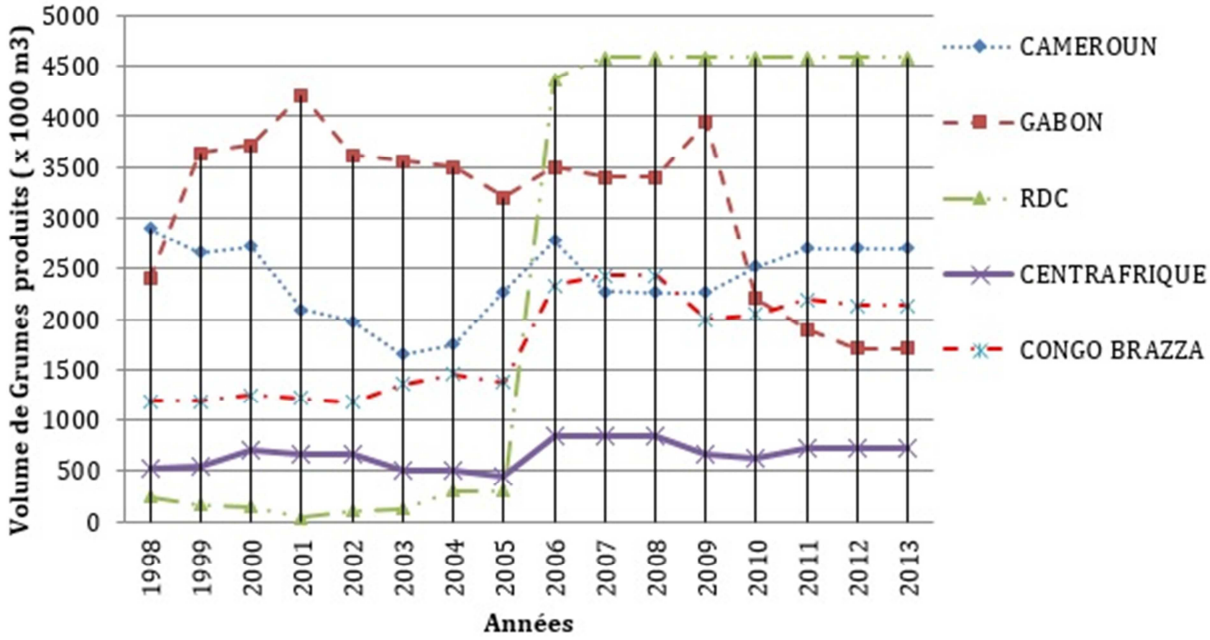



*Figure 1.3 : données statistiques des productions annuelles des grumes CIFOR (2014)*

La production est dominée par quelques essences. Les trois essences les plus exploitées représentent à elles seules 54% des productions du secteur formel (figure 1.4). L'Okoumé reste, avec 1,7 millions de $m^3$ de grumes produits en 2014, la première essence exploitée du BC. Le Sapelli arrive en seconde position, avec 1 million de $m^3$, avec pour principaux pays producteurs le Congo et le Cameroun. L'Ayous est la troisième essence la plus exploitée, avec environ 800 000 $m^3$, provenant essentiellement du Cameroun.

La part globale des autres essences n'a pas progressé ces dernières années, pour plusieurs raisons parmi lesquelles : l'absence de stratégies nouvelles de valorisation de certaines essences comme le sipo et l'iroko ; la réduction des marchés et/ou des prix, ce qui ne garantit pas la rentabilité en ce qui concerne les concessions éloignées des ports (les coûts de revient étant impactés par les coûts de transport) ; la faible abondance de certaines espèces comme le wengé qui se caractérisent par une aire de répartition localisée. Néanmoins quelques essences de bois durs ont connu une augmentation de leurs prélèvements, c'est le cas du Tali, de l'Azobé (depuis 2008) et de l'Okan avant 2008 (Figure 1.4).

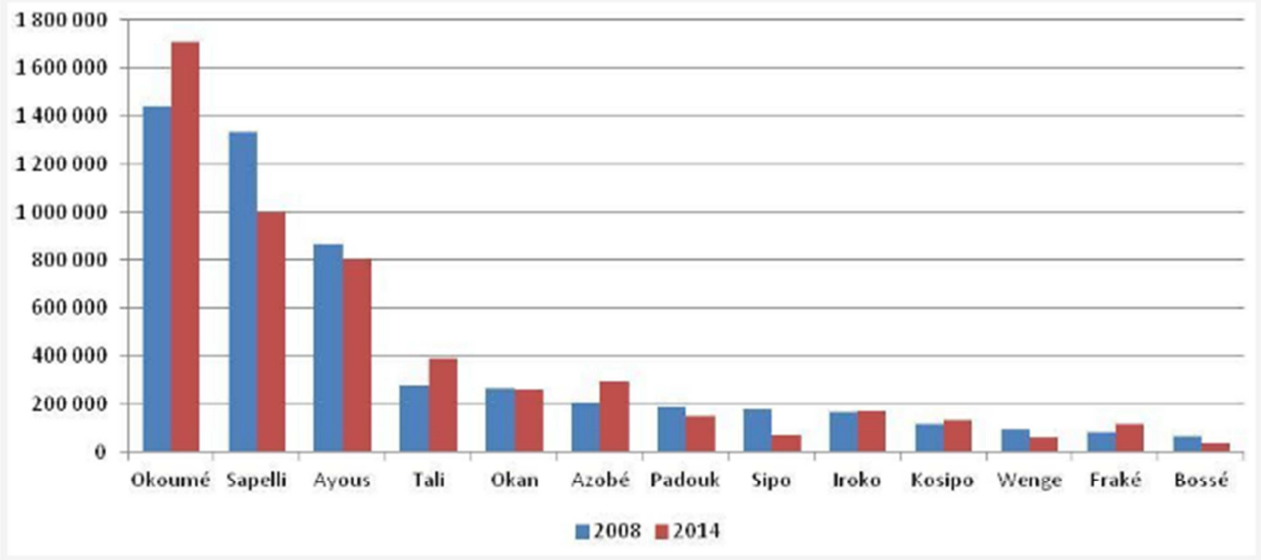



*Figure 1.4 : Productions annuelles évaluées par essence en 2008 et 2014 sur Bassin du Congo ($m^3$/an) Source: OFAC*

### 1.1.3 Transformation de la ressource ligneuse

La valorisation de la ressource ligneuse des pays du Bassin du Congo est dominée par la première transformation dont les sciages constituent le principal produit, avec une production de 1,2 million de $m^3$. Une grande partie de cette production est destinée à l'exportation, et est séchée artificiellement. On a vu apparaître ces dernières années quelques unités de production de deuxième transformation, avec des sciages rabotés, mais qui restent encore marginaux (de l'ordre de 5% de la production de sciage). Le principal produit de deuxième transformation est le contreplaqué, avec environ 151400 $m^3$ produits annuellement (Tableau 1.2) en Afrique Centrale (CIFOR, 2014).

*Tableau 1.2 : Données statistiques de production des produits bois du CIFOR (2014),*

| Production 2013 ($m^3$ réels de produits) | Cameroun | Congo | RDC | RCA | Gabon | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Grumes | 2702000 | 2136000 | 4587000 | 732000 | 1709410 | 11866410 |
| Sciages | 619670 | 100000 | 36320 | 11000 | 400540 | 1167530 |
| placages | 55190 | 49000 | 3000 | 1000 | 295660 | 403850 |
| Contreplaqué | 23110 | 35000 | 1000 | 860 | 91480 | 151450 |
| Rodin pour pâte à papier | - | 318492 | - | - | - | 318492 |

### 1.1.4 Aspect économique et technique du développement des CP

L'interdiction d'exporter certaines grumes en vigueur dans les pays du Bassin du Congo comme le Gabon depuis mai 2010 (Annexe 1.1), n'a pas débouché sur une expansion sensible du développement local des produits de deuxième transformation comme les contreplaqués et les placages. Ces derniers sont pourtant exportés vers l'UE. Au Cameroun, on dénombre plusieurs industries de fabrication des CP, parmi lesquelles : la société camerounaise de transformation du

bois (SCTB), la société nouvelle de Contreplaqués du Cameroun (SN COCAM), le groupe ALPICAM et PLACAM. Toutefois, la production reste marginale. Malheureusement, les seuils de production ne permettent pas de concurrencer les exportateurs de l'OIBT comme la Malaisie et l'Indonésie. Au rang des facteurs techniques relevés localement, figurent en bonne place (Djoufack, 2012) :

- la collecte très sélective des essences pour la fabrication des CP même quand ils ne font pas l'objet d'un usage à haute valeur. Malgré les diversités des essences du BC, seules quelques-unes sont utilisées, à savoir : l'ayous, l'ilomba, le fromager, le lotofa, le sapelli, l'okoumé ;
- la rupture d'approvisionnement des essences couramment utilisées pour la fabrication des CP ;
- l'apparition de fissures lors des séchages des plis ;
- les pertes considérables lors de la manutention des plis séchés pour le collage.

## 1.2 Présentation du matériau contreplaqué

### 1.2.1 Définition

Les CP sont des composites à base de bois, anisotropes, hétérogènes, viscoélastiques et hygroscopiques dont le comportement dépend fortement de l'environnement hygrothermique dans lequel ils sont mis en œuvre (Bos, 1995). Ils sont constitués de minces feuilles de bois déroulées dont l'épaisseur varie en fonction de son utilisation généralement entre 1 et 50 mm (Figure 1.5). Les plis du CP sont alternées et perpendiculaires l'une à l'autre, contrairement au lamibois dont les fibres des différentes plaques sont alignées. La cohésion des plis est assurée par collage et pressage à chaud. Ces plis peuvent être constitués de plusieurs essences de bois. Chaque pli est caractérisé par son épaisseur, sa masse volumique, son humidité et la nature de l'essence de bois dont il est issu.

Figure 1.5 **:** *Panneau contreplaqué okoumé intérieur-extérieur*

### 1.2.2 Historique

Les prémices du CP remontent à l'antiquité. On trouve les premières traces d'utilisation des feuilles de bois minces collées en Egypte, 3000 ans avant notre ère. Dans la Rome Antique, l'ancêtre des CP a été utilisé dans la fabrication des boucliers. Plusieurs milliers d'années plus tard, dans les années 1880, Wilson dépose un brevet aux Etats Unis concernant l'invention d'une machine dont l'utilisation allait permettre de rationaliser le déroulage des grumes et d'intensifier la production des minces feuilles de bois. Un autre brevet est déposé en Angleterre par Witkowski[1]. Il porte sur le collage des feuilles de bois à plis croisés à l'aide d'un adhésif de type caséine. Dans la même période, des travaux menés sur la mise en œuvre d'un canoé réalisé en trois plis de déroulage à l'état vert ont été réalisés par Chase (1880). Il précise que les plis à l'état humide peuvent être pressés à la forme souhaitée. Ces différentes avancées technologiques ouvrent la voie à la production industrielle du CP.

Cette production s'est véritablement développée pour répondre aux besoins de la construction aéronautique pendant la première guerre mondiale (Arnold, 2004). Le début du XXe siècle marque l'installation définitive du CP en Russie, Finlande et en Europe Centrale, à la faveur de la disponibilité des essences facilement déroulables comme l'épicéa. En France dans la même période, l'industrie du CP connaît un essor grâce à l'utilisation du peuplier.

En ce qui concerne les bois tropicaux, leur insertion dans l'industrie du contreplaqué s'est faite en deux étapes. La première a consisté à renseigner, à partir de 1918 les caractéristiques physiques et mécaniques des espèces de bois. Cette mission fût confiée aux laboratoires du Conservatoire des Arts et Métiers et à ceux de l'aéronautique (Guiscafré et Sales, 1997). Au terme de la Deuxième Guerre mondiale, les bois tropicaux arrivent en Europe. La recherche de nouveaux débouchés et l'apparition de nouvelles techniques d'utilisation de ces bois favorisent le développement de la fabrication des CP. Ils sont parfois constitués de plusieurs essences ligneuses et se présentent également sous la forme de panneaux mixtes bois-métal. L'utilisation de l'okoumé (*Aucoumea klaineana*) renforce la capacité de production et conforte l'envolée du CP en France notamment à cause sa capacité à être utilisé en milieu extérieur sous abri.

[1] http://www.lecontreplaqué.com/le-contreplaqué/histoire-dune-performance/

### 1.2.3 Procédés de fabrication

Il existe deux grands procédés de fabrication des CP . Nous présenterons dans un premier temps la méthode traditionnelle de fabrication du contreplaqué plan ou cintré sous presse, puis la technique de réalisation du contreplaqué moulé sous vide sera détaillée.

#### 1.2.3.1 Procédé traditionnel

Le process de fabrication des panneaux de CP plan standard comprend les étapes suivantes (Figure 1.6) :

1- Dégagement des écorces des grumes de bois et tronçonnage en billons de longueur donnée ;

2- Etuvage à la vapeur des grumes pour faciliter le déroulage pour les essences nerveuses (Daoui et al, 2007). Il est pratiqué habituellement dans l'industrie du déroulage pour « plastifier » le bois et fluidifier la résine, ce qui a pour effet de réduire les efforts de coupe et d'améliorer ainsi la durée de vie de l'outil et la qualité du placage. La température optimale d'étuvage est généralement choisie en fonction de la densité du bois. Elle varie entre 60°C pour les essences réputées mi-dures (Eyoung) et 100°C pour les bois durs (Iroko). Les essences dites tendres comme l'Ayous, l'Ilomba, etc… sont déroulées sans subir l'étuvage ;

3- Déroulage des grumes : il permet d'obtenir un ruban continu de bois de 1 à 3 m de largeur et d'une épaisseur de 2 à 3 millimètres.

4- Massicotage des feuilles pour les amener à la taille souhaitée et éliminer les défauts ;

5- Séchage des feuilles : Les feuilles déroulées sont alors émargés et conditionnées à l'air chaud pour obtenir un taux d'humidité uniforme imposé par les conditions d'utilisation des colles selon les conditions de séchage présentées au paragraphe 1.2.3.3 ;

Cette opération est précédée et suivie par un tri visant notamment à rejeter des plis défectueux, à détecter des singularités préjudiciables (nœuds non adhérents par exemple) ou encore à choisir des plis de meilleure qualité destinés au parement (plis de face).

6- Encollage. Une fois refroidis, les placages sont ensuite encollés les uns sur les autres selon des règles qui varient avec les types de panneaux et les épaisseurs attendues. On rencontre généralement deux types de colle servant à l'assemblage des panneaux :

   - Les colles de type Urée-Formol (U.F), destinées aux contreplaqués d'usage intérieur,
   - Les colles de type Phénol-formol (P.F.), employées pour les contreplaqués à usage extérieur ;

7- Pressage : Les plis encollés sont superposés et orientés en respectant la configuration souhaitée, puis subissent une opération de pressage à chaud nécessaire à une bonne polymérisation de la colle pendant 5 à 10 min. Les pressions exercées dépendent de l'essence retenue. Elles varient entre 1 MPa pour les essences tendres et 2 MPa pour les essences dures. La température est, quant à elle, directement liée au type de colle utilisé (110° à 115°C pour les U.F. et 115° à 120°C pour les P.F.). Les panneaux sortant de presse sont ensuite stockés dans les conditions d'utilisation pour être stabilisés par diffusion uniforme de l'humidité, puis délignés aux dimensions finales ;

8- Equarrissage, finition et contrôle.

Les dimensions des presses et les possibilités des scies commandées par ordinateur sont telles qu'il est difficile aujourd'hui de parler de dimensions standards dépendant des pays importateurs. L'épaisseur varie généralement de 1,8 mm (panneaux cintrables) à 40 mm.

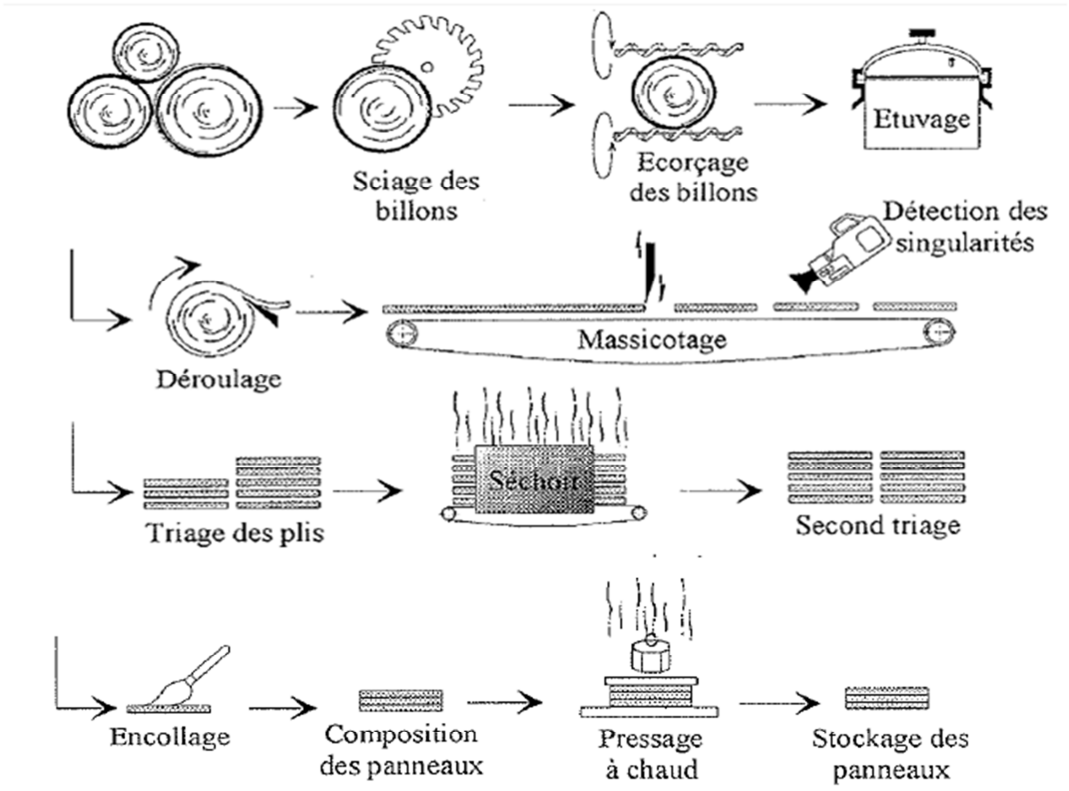



*Figure 1.6 : Processus de fabrication traditionnelle des Contreplaqués*

Au cours du déroulage, on note la formation de fentes de déroulage sur la face intérieure des plis, dues à leur mise en tension lors de la découpe des billons (Figure 1.7). Ces fentes peuvent être minimisées en ajustant les paramètres de déroulage (barre de pression, vitesse de découpe, étuvage, affutage de la lame etc.)

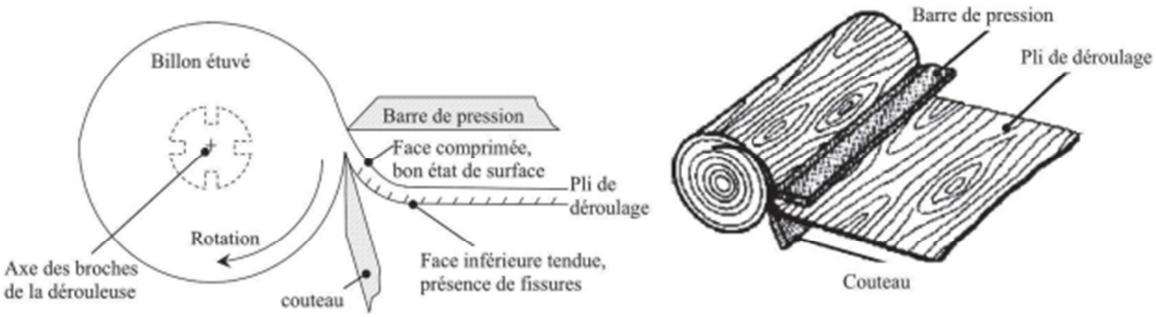



*Figure 1.7 : Présentation du procédé de déroulage de bois - Formation de fissures sur la face tendue (Navi et al, 2007, A. Dupleix)*

Les panneaux de contreplaqué à usage structural se sont développés avec l'apparition de résines synthétiques au XXème siècle. La résine est appliquée sur des plis de 6% à 12% de teneur en eau. Le grammage de colle appliqué se calcule de façon à avoir entre 65 g et 85 g de matière sèche de résine par mètre carré de collage (la valeur sèche est évaluée après séchage à 105°C), soit environ 180 – 250 g/m$^2$ (référence pour les colles aqueuses en usage dans les industries du contreplaqué). La viscosité des adhésifs adaptés au collage du contreplaqué industriel varie de 800 à 1600 mPa.s. Les plis de déroulage sont séchés, encollés et pressés à chaud afin d'accélérer la polymérisation de la colle et d'assouplir le bois. Ce chauffage est obtenu soit par des plateaux chauffants, soit par des radiations à hautes fréquences ou par induction. (Ngo et al, 2003; Navi et al 2005 ; Stevens et al 2008).

### 1.2.3.2 Moulage sous vide

Le moulage sous vide a notamment été développé dans les domaines aéronautique et naval afin de réaliser des produits faciles à mettre en forme dans leur état encore vert et possédant les avantages du contreplaqué classique (Heebink, 1943). Il s'agit d'une technologie utilisant la dépression pour comprimer le contreplaqué durant la polymérisation de l'adhésif.

Lorsque les placages sont encollés les uns sur les autres, le matériau composite ainsi formé est ensuite mis sous vide à l'aide d'une bâche imperméable et d'une pompe à vide (Figure 1.8.).

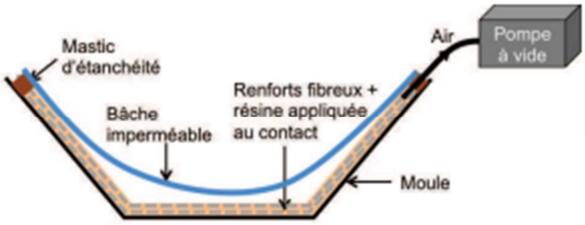



*Figure 1.8 : Représentation des techniques de moulage sous vide*

La bâche constitue une barrière flexible imperméable entre l'air extérieur et la pièce à mouler. La pompe à vide assure la dépression. Quand la membrane est fixée au moule, la pompe

évacue l'air du système, ce qui a pour effet de diminuer la pression à l'intérieur de la membrane. La pression atmosphérique répartie uniformément sur la surface extérieure de l'enveloppe force la bâche et son contenant à se comprimer. La différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de l'enveloppe détermine la pression appliquée sur le contreplaqué. La dépression maximum est obtenue lorsque le vide est parfait (1 bar), mais en réalité le différentiel de pression varie entre 500 et 900 mbar. Les avantages de la mise en forme et du collage sous vide sont (Ngo et al, 2003; Gougeon, 2005; 2010) :

– obtention d'épaisseurs et formes variables possibles,

– répartition uniforme de la pression sur l'ensemble de la surface, et contrôle de l'excès de résine,

– formation d'un panneau unique de grandes dimensions, sans jointure visible,

– utilisation des matériels peu onéreux et faciles à utiliser.

Les différents tissus nécessaires lors de la mise en œuvre d'un produit sous vide sont présentés sur la Figure 1.9. Le panneau est entouré d'éléments anti-adhésifs afin d'éviter qu'il n'accroche au demi-moule (cire) ou à la bâche (tissu d'arrachage) ; un feutre de drainage est présent pour absorber le surplus de résine et homogénéiser le vide ; un tissu perforé situé sous le feutre absorbant évite qu'une quantité trop importante de résine ne remonte vers la pompe. La bâche est scellée au demi-moule à l'aide d'un mastic d'étanchéité. Une prise de vide, reliée par un tuyau à la pompe à vide, permet d'évacuer l'air de la poche ainsi formée.

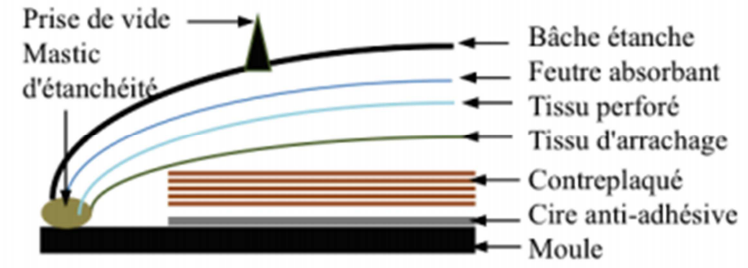



*Figure 1.9 **:** Représentation des techniques de moulage sous vide*

Les étapes de la fabrication de produits bois par moulage sous vide sont décrites par de nombreux auteurs (Nebesar, 1952 ; Ngo et al, 2003; Navi et al, 2005; Heebink, 1953; Glavin, 1946). Le moulage du contreplaqué produit des panneaux avec des degrés variés de courbure. Les plis de bois sont coupés sur mesure avant la pose pour obtenir des jointures adaptées. Ils sont ensuite collés et courbés simultanément sous vide. La colle utilisée doit polymériser lentement, pour permettre la mise en place des plis les uns par rapport aux autres.

### 1.2.3.3 Synthèse des connaissances sur les problèmes posés au cours du process traditionnel de fabrication des contreplaqués

Le process traditionnel de réalisation des CP consiste à sécher les plis de bois avant leur encollage. Le séchage des plis constitue donc une phase importante de ce process. Parmi les principaux procédés les plus utilisés, on cite : le séchage par déshumidification (température sèche entre 35°C et 75°C), le séchage conventionnel (température sèche entre 50°C et 100°C) et le séchage à haute température (température sèche supérieure à 100°C). La mise en œuvre de ces différents procédés peut engendrer un certain nombre d'incidents qui dégradent la qualité des plis. On distingue des incidents visibles (fentes et déformations non tolérables) et ceux qui ne sont malheureusement pas visibles (contraintes, collapses traduits par des affaissements et des déformations internes, etc..). Un des corollaires immédiats est la dégradation de la qualité attendue des CP et la non-éligibilité de leur usage dans certaines classes d'emplois (Villière, 1964).

Le séchage sous vide (procédé sous vide discontinu ou sous vide continu à plaques chauffantes ou en vapeur surchauffée) reste encore un procédé marginal (Aléon et al., 1991 ; Baixeras, 1995).

En marge des problèmes liés au séchage, la stabilité dimensionnelle, la durabilité et des qualités d'apparence médiocres peuvent également affecter les plis de bois (Washusen et al., 2009). Ces problèmes se posent avec acuité dans le cas des espèces tropicales de bois durs. En Australie par exemple, l'industrie des contreplaqués est alimentée par une matière première faite d'essences de bois durs issus d'espèces plantées comme l'eucalyptus.

D'une manière générale, les principaux désordres rencontrés après déroulage et/ou séchage des plis (gerces, fentes, gauchissement) peuvent s'expliquer par le développement des tensions internes importantes. Les plis de bois se déforment et peuvent rompre lorsque les contraintes transversales deviennent trop élevées. Le développement des produits collés à l'état vert constitue une alternative explorée depuis de plusieurs années. Cette approche permet de créer une chaîne d'élaboration de matériaux techniques, sans ruptures de charges dans le processus industriel grâce à un séchage en fin de cycle. Au niveau industriel, cette technique permet un gain énergétique, un rendement en matière plus important et l'usage des résines écologiques telles que le polyuréthane. Les travaux de Lavalette (2013) sur le séchage sous vide des contreplaqués collés à l'état vert ont permis d'obtenir des produits utilisables pour les bordés de bateaux. Toutefois, l'apparition des fissures, du fait des tensions internes au cours du processus de séchage non quantifiées par l'auteure a été jugé non préjudiciable pour l'industrie navale. Ces travaux peuvent ainsi contribuer à faire baisser la grande pression qui pèse sur l'okoumé, espèce utilisée depuis de nombreuses années dans

le développement des contreplaqués marins dans le secteur de la construction navale, aujourd'hui menacée d'épuisement en forêt (IUCN, 2018).

Le séchage est un processus incontournable dans la transformation du bois en produits finis de contreplaqué qui se doit d'être optimisé en fonction des critères qualité, temps et coût. Il permet de diminuer le plus rapidement possible l'humidité du bois tout en limitant au minimum les pertes éventuelles de qualité (gerces, tensions internes, fissures). La présence de tensions internes au cours du séchage est causée par la distribution non uniforme de l'humidité dans la masse du bois due à sa structure hétérogène et à la formation inévitable de gradients d'humidité causée par le mouvement de l'eau vers la surface. Les travaux de Clouet (2014) sur le comportement des assemblages des bois de chênes collées à l'état vert ont permis d'appréhender par des approches expérimentale et numérique les contraintes hygro-mécaniques qui peuvent survenir dans des bois et les joints de colle pendant le séchage. A partir d'une étude basée sur la mesure de champs de déplacement, un modèle numérique de comportement a été élaboré. Il rend possible une comparaison aisée de résultats expérimentaux de résultats de simulations à des résultats expérimentaux. Toutefois, ce modèle est « purement élastique », ce qui ne permet pas de traduire avec une bonne finesse le comportement des matériaux en présence (bois, et bois-collé). De plus, la transposition de ce comportement au contreplaqué peut être contrariée par certains facteurs comme le volume de matière (plus faible dans le contreplaqué et plus élevé dans les bois collés), l'anisotropie (beaucoup plus marquée dans le cas des plis de bois disposés de manière croisée). Ces arguments militent en faveur de l'élaboration d'un modèle de comportement au séchage propre aux contreplaqués.

## 1.3 Approches de valorisation des essences de bois en contreplaqués : état de l'art

La valorisation des essences de bois en contreplaqué est pilotée de manière générale par de nombreux outils, au premier rang desquels figurent : l'amélioration de la qualité des placages notamment au cours du déroulage, le développement des bases de données, la formalisation du calcul prévisionnel et la qualification expérimentale des produits.

### 1.3.1 Le contrôle génétique des propriétés du bois

Le contrôle génétique consiste à identifier les corrélations entre les propriétés génétiques (diamètre et rectitude du tronc, teneur en cellulose, diamètre à hauteur de poitrine) couplées à certaines mesures in situ (vitesse des ondes ultrasonores des billons et des arbres sur pied), et le module d'élasticité des placages (Blackburn et al., 2012 ; Hamilton et al., 2017 ; Blackburn et al., 2018). Son principal intérêt réside dans la possibilité de sélectionner avec succès les arbres sur pied

qui produiront des CP de qualité satisfaisante. Cette démarche s'applique généralement aux espèces en plantation comme l'Eucalyptus nitens. Les succès obtenus, en Australie notamment, indiquent que les généticiens devraient pouvoir contribuer significativement à l'amélioration des propriétés des placages déroulés et des contreplaqués utilisables en structure (Blackburn et al., 2018). De plus, la corrélation entre la vitesse ultrasonique des arbres sur pied et le module d'élasticité (MOE) des placages constitue une démarche prédictive prometteuse du point de vue de la gestion génétique des espèces qui constituent la matière première de l'industrie des CP.

Ces résultats montrent qu'il est possible de valoriser correctement des espèces de bois durs en plantation comme l'Eucalyptus en jouant sur les variables génétiques des espèces. Toutefois, cela suppose une maîtrise correcte du séchage de l'essence ainsi étudiée. De plus, étant axée sur une seule essence, l'application de cette démarche aux espèces tropicales du Bassin du Congo ne semble pas réaliste en raison des potentiels coûts d'investigation et l'abondante ressource ligneuse, fortement diversifiée au plan génétique (FAO, 2006). Cette ressource est largement utilisée à l'état naturel dans tous les pays de la sous-région.

### 1.3.2 L'amélioration de la qualité du bois au déroulage

La qualité des placages peut être fortement dégradée dans le bois de cœur, ce qui se traduit par une rugosité très marquée (George et Miller, 1970 ; Hecker, 1995). Cette anomalie peut s'expliquer par la différence très significative d'humidité du bois vert entre l'aubier et le duramen. Dans le cas du douglas par exemple, le taux d'humidité du duramen peut être proche de 30 % tandis qu'il atteint 130% voire 150 % dans l'aubier (Mothe et al., 2000). De plus, le déroulage du bois à faible teneur en eau s'accompagne souvent d'arrachements, de fissurations et de déstructurations des placages (Thibaut, 1988). Une solution consiste en la reprise d'humidité des différents billons au moyen de traitements hygrothermiques (réhumidification). Cette reprise peut se faire par bouillotage conventionnel où les billons séjournent dans le bain d'eau à 20°C pendant 24 à 48 h après une courte période de chauffe (50°C à 80°C), soit par des cycles chaud/froid, soit par des cycles vide/pression.

Des études réalisées sur les bois issus des plantations de Douglas ont montré que les techniques d'étuvage traditionnelles par immersion ne permettent pas une reprise d'humidité significative des billons, même de très courte longueur. Seule l'imprégnation sous autoclave permet d'atteindre un niveau et une homogénéité d'humidité acceptables pour prétendre à un déroulage de qualité (Mothe et al., 2000). L'eau peut également jouer un rôle important dans la qualité du déroulage. Elle intervient surtout dans les mécanismes de coupe en réduisant le coefficient de

frottement bois-métal (Thibaut, 2012). La présence d'eau libre facilite également les transferts de chaleur pendant le déroulage (Mothe et al., 2000)

### 1.3.3 Le développement des bases de données

Les essences de bois tempérées ont été longtemps utilisées pour le développement industriel des CP. Toutefois, plusieurs bases de données listent et spécifient les renseignements technologiques des essences tropicales de bois utilisables aux mêmes fins (Youngquist, 1999). Parmi les plus récentes, on peut citer : TROPIX 7.0 (CIRAD, 2011), PROTA4U, ITTO (ITTO, 2001), TRADA (TRADA, 2000) et Woodhand book (Forest Product Laboratory, 2011).

La base de données TROPIX 7.0 présente les résultats d'essais de caractérisation menés sur de nombreux bois tropicaux en ce qui concerne la description macroscopique et l'apparence du bois, les propriétés physiques et mécaniques principales (représentées par leurs valeurs moyennes et leur écart type), l'aptitude au séchage et au traitement de préservation, l'aptitude au déroulage et les utilisations effectives ou potentielles. L'aptitude au déroulage permet de regrouper les essences tropicales de bois en quatre catégories : « Bonne », « Mauvaise », « Non recommandée ou sans intérêt », « Aucune information disponible ». Cette catégorisation n'est pas expliquée dans la base de données. Les utilisations en CP sont regroupées en deux familles, à savoir : « face ou contreface de contreplaqué », et « intérieur de contreplaqué ». Le tableau 1.3 présente des exemples de catégorisation et de regroupement de certaines essences tropicales de bois du BC.

*Tableau 1.3 : Données et spécification de l'aptitude au déroulage et de l'utilisation en contreplaqué de certaines essences de bois du BC (extrait de Tropix 7.0).*

| **Aptitude au déroulage** | | **Utilisation en contreplaqué** | |
|---|---|---|---|
| Catégorisation | Exemples | Catégorisation | Exemples |
| Bonne | Abura (*hallea ciliata*) | Face ou contreface du contreplaqué | Acajou (khaya ivorensis) |
| Mauvaise | Avodire (*Turraeanthus africanus*) | Intérieur d'un contreplaqué | Abura (hallea ciliata) |
| Non recommandée ou sans intérêt | Afrormosia (*Pericopsis elata*) | | |
| Aucune information disponible | Angueuk (*Ongokea gore*) | | |

PROTA4U est une base de données interactive, disponible en ligne (http: //www.prota4u.org). Elle a été produite par Plant Resources of Tropical Africa. Elle renseigne la description, la distribution, la transformation, les utilisations, la production et le commerce des

espèces d'arbres. ITTO (2001) est la base de données de l'Organisation Internationale des Bois Tropicaux (OIBT). Elle concerne les espèces tropicales de bois peu utilisées, contient des informations sur les propriétés du bois (valeurs moyennes uniquement), les utilisations finales, l'anatomie, le séchage et la maniabilité. La base de données TRADA (Timber Research and Development Association) vise à donner un compte rendu plus large et plus adéquat des bois commerciaux du monde (TRADA, 2000). Woodhand book présente une synthèse de l'information relative au bois et aux produits d'ingénierie à base de bois. Elle permet de spécifier clairement en son chapitre 10 les classes de résistance mécanique des CP destinés à usage externe ou interne. (Youngquist, 1999). Plus de 70 espèces utilisables en CP y sont classées en 5 groupes de résistance mécanique. Quelques espèces tropicales de bois de Malaisie y sont mentionnées, à savoir : le kapur, le keruing et le meranti rouge. Les espèces du BC ne sont pas renseignées dans ce tableau.

### 1.3.4 Formalisation du calcul prévisionnel

La possibilité de prévoir les caractéristiques élastiques de membrane, de flexion-torsion et les termes de couplage des contreplaqués est documentée depuis de nombreuses années (Guitard, 1987). L'approche repose sur l'association des modèles prévisionnels de comportement élastiques tridimensionnels et la théorie des plaques stratifiées élastiques. Le choix du modèle dépend de la nature de l'essence retenue (résineux ou feuillus) (Guitard et Fournier,1994). Son adaptation à une essence donnée est assurée par une correction en loi puissance de masse volumique, applicable sur une large plage de densité (de 100 à 1280 kg/m$^3$). La formalisation dans le cas des bois feuillus est donnée par (équation 1.1) :

$$S_{ij12}^{-1} = S_{ij}^{-1}\left(\frac{\rho}{0{,}65}\right)^k \qquad \text{(eq 1. 1)}$$

avec i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6.

$S_{ij12}^{-1}$ est l'inverse du tenseur des complaisances élastiques du bois feuillus considéré, de masse volumique ρ à 12 % de teneur en eau ;

$S_{ij}^{-1}$ est l'inverse du tenseur des complaisances élastiques du bois feuillus standard à 12 % de teneur en eau. Les éléments permettant de le renseigner complètement sont présentés dans le tableau 1.4 ;

ρ est la masse volumique de l'essence de bois considérée.

*Tableau 1.4 : caractéristiques mécaniques du bois feuillus standard à un taux d'humidité de 12% (Guitard, 1987).*

| Densité | $E_R$ | $E_T$ | $E_L$ | $E_T/\nu_{TR}$ | $E_L/\nu_{LT}$ | $E_R/\nu_{RL}$ | $G_{TL}$ | $G_{LR}$ | $G_{RT}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,65 | 1810 MPa | 1030 MPa | 14400 MPa | 2680 MPa | 31200 MPa | 37300 MPa | 971 MPa | 1260 MPa | 366 MPa |

On réalise d'autre part un ajustement linéaire des caractéristiques élastiques à l'aide des constantes $a_{ij}$ dans le domaine hygroscopique sous la forme (équation 1.2) :

$$S_{ijH}^{-1} = S_{ij12}^{-1}\left[1 - a_{ij}(H - 12)\right] \qquad \text{(eq 1. 2)}$$

avec i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 et H = humidité du bois

L'intérêt de cette approche réside dans l'utilisation de la masse volumique ρ et du taux d'humidité H comme paramètres indicateurs des propriétés élastiques du bois constitutif des plis (Guitard et El amri, 1986). Cela permet d'envisager un contrôle des propriétés élastiques du contreplaqué au cours du séchage. L'approche permet également d'analyser les contreplaqués « équilibrés » (nombre de plis impair) et « déséquilibrés » (nombre de plis pair), avec la possibilité de prendre en compte l'orientation du fil des différents plis. Le concept de « l'équilibre » sous-entend une symétrie géométrique et matérielle du panneau de part et d'autre de son plan moyen appelé «âme» (Bos, 1995). Son utilisation rend possible l'évaluation de l'anisotropie des propriétés élastiques de membrane et de flexion-torsion. Elle permet également d'intégrer les incertitudes de fabrication (variabilité des épaisseurs des plis par exemple).

Malgré les nombreux avantages cités précédemment, cette approche de valorisation est en très grande partie limitée par sa restriction au comportement élastique du contreplaqué. Son utilisation s'avère inappropriée lorsqu'il s'agit de prévoir les contraintes pouvant se développer au-delà de la phase élastique du matériau, comme cela est le cas au cours du processus du séchage du bois. De plus, l'évaluation des termes correctifs des grandeurs matérielles est déterministe, et donc entachée d'incertitudes dont les effets n'ont pas été quantifiés.

### 1.3.5 Qualification expérimentale des produits : comportement mécanique des contreplaqués

La qualification expérimentale constitue un axe prépondérant de valorisation des essences de bois dans les Engineered Wood Products en général et les CP en particulier. Elle peut être déclinée en deux grandes familles d'approches. La première concerne l'identification du comportement mécanique des CP sans prise en compte des effets de température ou des

mouvements hydriques dans le bois (Annexe 1.2). La seconde est plus globale, et intègre l'ensemble des phénomènes physiques et mécaniques rencontrés.

En 1996, Bos et Guitard ont procédé à une validation expérimentale du modèle prévisionnel du comportement mécanique des contreplaqués à base de bois d'okoumé, de dimensions 500x100x14 mm. Cette essence de bois a été choisie en raison de plusieurs facteurs parmi lesquels : son utilisation traditionnelle dans la confection des CP, la rectitude de fil, la faible nodosité, une grande aptitude au déroulage et de bonnes qualités esthétiques. Deux moyens expérimentaux sont au cœur de la démarche : l'essai de flexion 4 points et l'essai de torsion. Le principal apport de l'essai BOGUI est l'utilisation de deux appuis ponctuels dans la largeur de l'échantillon, au lieu d'un appui linéique. Les roulements présents aux appuis sont conservés. Il permet de déterminer les souplesses de flexion-torsion du CP. Lavalette (2013), présente de façon très détaillée le fonctionnement de cet essai. Le principe de l'essai GOBOGUI consiste à appliquer un moment de torsion pure sur l'éprouvette et de déduire la souplesse correspondante. Un très bon accord a été observé entre les évaluations expérimentales et les prévisions de calcul, en tenant compte de l'angle de prélèvement des échantillons de CP. Toutefois, cette démarche n'a pas encore été confirmée sur d'autres essences de bois développées en CP. De plus, l'okoumé est une essence de bois menacée d'épuisement en forêt (IUCN, 2013).

Fun et Jumaat (2013) ont investigué, dans une approche réglementaire, une comparaison des propriétés mécaniques des CP réalisés à base de red seraya (*Shorea spp*.), espèce tropicale de bois de Malaisie, au moyen de deux démarches expérimentales, à savoir : les normes EN 310 (1993) et EN 789 (2004). La norme EN 310 est basée sur l'essai de flexion 3 points. Elle est utilisée dans le cadre de l'évaluation du contrôle interne de la qualité des CP au sein de l'industrie. La norme EN 789 (1993) se rapporte à un essai de flexion 4 points. Elle est largement utilisée pour renseigner la qualité finale des CP en laboratoire. Les résultats ont montré que la Norme EN 310 surestime le module de rupture en flexion (MOR) déterminé par la Norme EN 789. Un effet inverse est observé en ce qui concerne les MOE. De plus, la corrélation bien connue entre le MOR et le MOE dans chaque cas peut être pénalisée par la variabilité des propriétés des plis.

De nombreux auteurs ont également investigué le comportement physique et mécanique des CP sous diverses sollicitations (Sretenovic et al., 2005; Dieste et al., 2008; Yusuf et al., 2015; Gilbert et al., 2016 ). Les objectifs recherchés étaient circonscrits en grande majorité autour de la qualification des CP à l'échelle du matériau par l'utilisation des sollicitations uni axiales (flexion 3 ou 4 points, cisaillement). Lavalette (2013) analyse le comportement mécanique des CP sous sollicitations composées (traction-cisaillement) afin d'identifier leur critère de rupture.

Leurs applications sont variées : coques de bateaux, murs minces, construction, etc. Dans ces divers travaux, les plis de bois étaient constitués des espèces tempérées suivantes : *picea abies, pinus pinaster, Betula pubescens, Betula pendula, Fagus sylvatica, Araucaria cunninghamii*.

## Conclusion

Les forêts du BC jouent un rôle déterminant sur les plans environnemental, social et économique des pays de l'Afrique Centrale. L'exploitation de leur ressource ligneuse est dominée par les sciages en ce qui concerne la première transformation et les contreplaqués dans le cas de la deuxième transformation. Les niveaux de production du CP restent très marginaux à l'échelle internationale. Cette situation pourrait s'expliquer en grande partie par l'absence de stratégies de valorisation mises en œuvre depuis de nombreuses décennies. Les essences utilisées actuellement pour la fabrication des CP restent très limitées parmi lesquelles l'okoumé, l'ayous et le sapelli, qui présentent des signes d'épuisement en forêt. Par ailleurs, le process traditionnel de mise en œuvre de ce produit est fortement susceptible de poser des problèmes tels que l'apparition des fissures lors du séchage des plis, les pertes considérables lors de leur manutention préalablement à leur encollage.

Plusieurs stratégies de valorisation des espèces ligneuses en contreplaqués ont été identifiées dans la littérature. Elles sont axées notamment sur la qualification expérimentale des produits, les bases de données et le calcul prévisionnel des CP dans le domaine élastique. L'information relative à l'utilisation des espèces tropicales du BC en contreplaqué reste marginale car limitée au plan expérimental à l'okoumé. Cette information ne semble pas actualisée. De plus, elle est difficilement transposable aux autres essences de bois en présence.

Au vu de ce qui précède, l'élargissement du potentiel exploitable des essences destinées à la mise en œuvre des CP constitue une préoccupation de premier plan au regard de la grande diversité des espèces ligneuses en présence et de la menace d'épuisement de la ressource.

Afin de remédier aux pertes de rendement matière des bois actuellement déroulés, mais surtout d'introduire des essences de bois peu ou pas valorisées en déroulage et abondantes en forêt, il est question de repenser le process de mise en œuvre du CP. Dans le chapitre suivant nous présentons un choix raisonné d'essences sur les critères de l'ingénieur, sachant que nous développons la technologie intégrée du collage et du séchage.

# CHAPITRE 2 : CHOIX MULTI CRITERES DES ESSENCES DE BOIS POUR LA FABRICATION DES CONTREPLAQUÉS

Introduction ..... 29

2.1 Identification et justification des critères ..... 29

2.2 Présentation de l’ensemble des choix et de la structure de préférence des essences de bois.. 36

2.3 Méthodologie ..... 47

2.4 Résultats ..... 54

2.5 Discussions..... 65

Conclusion..... 67

# Introduction

Nous avons montré dans le chapitre bibliographique que l'industrie des CP dans le BC est caractérisée par l'utilisation d'un nombre limité d'espèces ligneuses depuis de nombreuses années, ce qui entraine leur raréfaction voire leur extinction à terme. Une solution consiste à développer des outils qui aident à sélectionner de nouvelles espèces de façon raisonnée à partir de la diversité des espèces en présence. Le choix raisonné d'une essence ou d'une famille d'essences de bois tropicaux pour un produit d'Ingénierie donné fait interagir plusieurs acteurs de la gestion durable des forêts : écologues, gestionnaires forestiers, ingénieurs, producteurs de bois, technologues du bois, populations riveraines, etc… Il est donc important de prendre en compte les préoccupations de ces différents acteurs afin d'assurer un équilibre entre les fonctions écologiques, socioculturelles et technologique escomptée des produits obtenus à partir des essences exploitables de la forêt. Parmi les nombreux outils de sélection envisageables, nous nous sommes intéressés à la sélection multicritère des espèces de bois du BC.

Le problème multicritère posé est celui de la hiérarchisation des choix d'essences tropicales de bois intéressantes au développement des CP, et compatibles avec les principales exigences de la gestion durable des forêts du BC. La décision de choix peut alors être faite par un tri résultant d'une affectation de chaque essence de bois à une catégorie déterminée ou par leur rangement de la plus avantageuse à la moins avantageuse ou vice versa (Taillandier, 2011). Afin de bien spécifier le problème, trois composantes sont à définir : l'identification et la justification des critères traduisant les points de vue des acteurs, la définition d'un ensemble de choix potentiels (essences de bois) et l'élaboration d'une structure de préférence au sein de chaque critère (Mangin, 2004 ; Oum, 2014). Quatre points constituent l'ossature de ce chapitre. Le premier concerne la justification de la méthode multicritère choisie, le deuxième présente l'approche méthodologique. Les résultats obtenus sont exposés dans le troisième point et discutés dans le quatrième.

## 2.1 Identification et justification des critères

Un critère se définit par l'expression qualitative ou quantitative d'un point de vue, d'aptitude ou d'objectif permettant d'établir un jugement. Dans cette partie, nous présentons et nous justifions les critères sur lesquels porte la sélection des essences de bois. Dans l'objectif de se rapprocher au mieux des exigences relatives à la gestion durable des forêts et au développement raisonné des bois d'ingénierie tropicaux, trois types de critères sont habituellement retenus, à savoir : les critères écologiques, les critères d'ingénierie des CP, et les critères liés aux aspects socio-économiques et culturels.

### 2.1.1 Critères écologiques

Les critères écologiques sont renseignés par le statut de conservation en forêt, le potentiel exploitable et le potentiel de régénération naturelle post-récolte des essences de bois (Oum, 2014).

#### 2.1.1.1 Statut de conservation en forêt

Le statut de conservation d'une espèce est un indicateur permettant d'évaluer l'ampleur du risque d'extinction de l'espèce à un instant donné. Il est susceptible d'évoluer en fonction de l'augmentation ou de la diminution des menaces qui pèsent sur son existence. Deux facteurs critiques peuvent justifier ce risque de déclin des espèces arboricoles : la déforestation et l'exploitation très sélective de la ressource ligneuse.

La déforestation fait partie des facteurs les plus significatifs qui ont de l'impact sur la réduction de la biodiversité (Sala et al., 2000). On estime qu'en 2040, 17 à 35 % des espèces vivant dans les forêts auront disparu (Reid, 1992 ; Grieser Johns, 2004). Cette prédiction alarmiste est corroborée par des auteurs comme Hughes et al (1997) qui estiment que le nombre d'espèces végétales et animales qui s'épuisent chaque année dans les forêts tropicales se situe entre 14 000 et 40 000. Toutefois, d'après Grieser Johns (2004), aucune espèce de plante ou animale n'est encore identifiée comme éteinte du fait de l'exploitation forestière dans les régions tropicales.

Malgré ces points de vue contrastés, il est admis qu'une perte significative des espèces vivantes à l'échelle du globe se produira dans les prochaines décennies si la déforestation des forêts tropicales se poursuit à son rythme actuel (Reid, 1992). La surface forestière régresse nettement chaque année à un taux de 0,16 % en Afrique centrale (Duveiller *et al*., 2008). Ajoutée à la déforestation, l'exploitation hyper sélective pose la question d'une surexploitation d'essences ciblées, les plaçant en danger d'épuisement en forêt. Elle se caractérise par une surexploitation sur de vastes surfaces des essences à haute valeur commerciale. C'est donc un facteur d'érosion supplémentaire de la diversité biologique avec des risques de raréfaction de certaines espèces ligneuses.

La prise en compte du statut de conservation parmi les critères de sélection des essences participe donc au souci majeur de conserver la richesse et la diversité des espèces ligneuses du BC. Pour atteindre cet objectif, il est également nécessaire de prendre en compte le potentiel exploitable de ces essences.

#### 2.1.1.2 Potentiel exploitable

Le potentiel exploitable désigne le volume du fût des arbres dont le diamètre est supérieur au Diamètre Minimum d'Exploitabilité (DME), rapporté à une surface unitaire donnée, qui est en général l'hectare. Le DME est le diamètre en dessous duquel la coupe d'un arbre est prohibée. Il est fixé par la législation forestière et peut être relevé pour soutenir la durabilité de l'exploitation de l'essence concernée. La connaissance du potentiel exploitable est une composante essentielle de la viabilité d'une unité de production des CP. En effet, les industries de CP utilisent des volumes importants de matière ligneuse.

Avec près de 600 essences ligneuses inventoriées (FAO, 2006), les écosystèmes forestiers du Cameroun sont représentatifs du Bassin du Congo. Le biome dominant est la forêt tropicale ombrophile caractérisée par des arbres de grande taille à croissance lente tant qu'ils n'émergent pas sur la canopée, stade auquel ils se dotent souvent de puissants contreforts. Le potentiel exploitable est dominé par un nombre très réduit d'essences (paragraphe 1.1.2).

Le potentiel exploitable est un critère écologique important de sélection des essences. Toutefois, après l'abattage d'un arbre exploitable, il est important de s'intéresser à sa reconstitution.

#### 2.1.1.3 Potentiel de reconstitution naturelle post-récolte

La connaissance du potentiel exploitable n'est pas suffisante dans un contexte de gestion durable de la forêt. Il est impératif de tenir également compte de l'aptitude des essences à se renouveler, afin d'assurer une continuité d'exploitation aux générations futures : d'où le choix porté sur le critère de renouvellement ou le potentiel de régénération post-récolte.

L'exploitation d'un massif forestier pour la production de bois pose toujours le problème de reconstitution de la forêt (Ducrey et Labré, 1985). La régénération post-récolte est un critère indispensable quand l'on tient compte des principales menaces, que sont la déforestation et la surexploitation de certaines essences ligneuses dans le Bassin du Congo. Elle renseigne sur la durabilité de l'aménagement des massifs forestiers. La régénération naturelle permet la conservation d'une certaine diversité dans les forêts tropicales (Ducrey et Labré, 1985). En outre, elle est régulièrement pratiquée dans la partie camerounaise du massif forestier congolais. C'est pour ces raisons que la régénération naturelle post-récolte a été choisie comme critère écologique de sélection des essences de bois.

Les critères écologiques sont déterminants en termes de durabilité de la ressource ligneuse et aident au maintien de la diversité des essences. Toutefois, l'emploi des CP en structure, en

ameublement doit également répondre aux exigences de fiabilité et de sécurité. Ce qui nécessite la prise en compte des critères d'ingénierie du bois.

### 2.1.2 Critères d'ingénierie

Le déroulage des grumes en placages suivi du séchage et de leur encollage constituent des opérations essentielles de la mise en œuvre du CP. Leur emploi doit satisfaire aux exigences de sécurité et de fiabilité dans le temps selon le milieu d'utilisation. Cela suppose des produits performants. C'est ce qui nous a conduits à retenir les six critères d'ingénierie suivants : l'aptitude au déroulage des grumes, la présence du contrefil, l'aptitude au collage traditionnel, la résistance mécanique (Module d'élasticité), la rétractibilité et la durabilité naturelle ou conférée.

#### 2.1.2.1 Aptitude au déroulage des grumes

L'une des caractéristiques recherchées sur les bois de transformation en CP est son aptitude au déroulage sous forme de plis. La qualité des CP peut être pénalisante lorsqu'elle cause de grandes difficultés de déroulabilité. Cela justifie la faible ou la non utilisation de certaines essences.

Toutes les essences peuvent être théoriquement déroulées ou tranchées après un traitement thermique adéquat et un réglage optimum des paramètres (CIRAD, 2011). Toutefois, il faut noter que les essences habituellement recherchées en déroulage sont tendres à mi-dures, avec des grumes assez circulaires et droites et sans défaut (nœuds par exemple) afin d'obtenir un bon rendement.

#### 2.1.2.2 Présence des contrefils

Les bois comportant des contrefils très marqués, se déroulent plus difficilement et surtout engendrent des déformations parfois sévères lors du séchage des plis du CP. Ce qui occasionne des grandes fissures et des pertes importantes de matériaux lors des encollages des plis.

#### 2.1.2.3 Aptitude au collage traditionnel

La tenue d'une essence de bois au collage est un élément déterminant de l'intégrité structurale du CP. Il est donc important de considérer l'aptitude au collage traditionnel des essences. Il faut noter que les bois denses (densité supérieure à 0,6) sont réputés difficiles à coller. Cette difficulté est corrélée à un certain nombre de facteurs parmi lesquels : l'exsudation des résines, la forte anisotropie, la carbonisation de la surface à encoller après rabotage et une faible porosité de la surface (Gérard, 1999). Le tableau 2.1 présente des exemples de difficultés au collage de certaines essences et propose des solutions permettant d'y remédier.

Les adhésifs à base de résorcine confèrent au bois collé une stabilité supérieure à celle du bois massif et conviennent bien au climat tropical (colles à prise lente offrant une bonne résistance à l'humidité). Du fait de l'émission du formaldéhyde (produit volatil cancérigène), ils sont peu à

peu remplacés par des polyuréthanes qui s'affranchissent de ce défaut et fonctionnent bien avec des substrats ligneux à l'état vert (Pommier, 2006).

*Tableau 2.1 : Difficultés de collage des bois tropicaux : description et solutions (Elbez et Bend 1991, FCBA 2008; CIRAD 2011)*

| Caractéristiques | Exemples | Difficultés de collage | Solutions |
|---|---|---|---|
| Bois acides | Tola (gossweilerodendron balsamiferum) | - Forte acidité associée à un taux d'humidité élevé retarde la prise des colles résorcines<br>- Tâches dues à la présence de fer | Sécher le bois en l'amenant à une teneur en eau de 6 à 12%<br>-Augmenter la durée de séchage (de 50% au moins)<br>-Effectuer la prise de la colle à température élevée (40 à 60°C) |
| Bois carbonisés en surface (bois siliceux ou très contrefilés) présentant des irrégularités de surface | Bossé (guarea cedrata) | -Mauvais contact des surfaces à assembler<br>-Mauvais mouillage | Procéder à un affûtage fréquent de l'outillage<br>-Poncer les surfaces usinées<br>-Augmenter la pression de serrage<br>-Sabler les surfaces avant leur collage |
| Bois se tâchant facilement | Assamela<br>(pericopsis elata) | | - L'application séparée d'un durcisseur acide (colle urée formol) peut engendrer de nombreuses tâches, principalement en présence de fer.<br>-Eviter d'utiliser des colles ayant pu être en contact avec des matériaux ferreux (exemple : récipients rouillés)<br>-Faire disparaître les tâches à l'aide d'une solution d'acide oxalique à 10% (solution toxique, irritante, pouvant provoquer des changements de coloration sur certaines essences) |
| Résines/matières grasses | Doussié<br>(afzelia africana) | Mouillage imparfait de la surface de bois | - Sécher à une température supérieure à 70°C<br>-Poncer les surfaces à coller<br>-Coller immédiatement après les opérations d'usinage<br>-Augmenter la pression de serrage ;<br>-Employer des colles alcalines si possible ;<br>-Utiliser en cas de risque de léger suintement, des colles à pouvoir mouillant très élevé |
| Bois de forte densité | Azobé (lophira alata)<br>-Alep (desbordesia glaucescens) | Faible porosité de surface pouvant conduire à un ancrage mécanique insuffisant | Poncer les deux faces à assembler ;<br>-Appliquer la colle sur les deux faces à mettre en contact ;<br>-Observer un temps d'assemblage ouvert suffisant ;<br>-Effectuer une prise de la colle à haute température (40°, 60°C) dans le cas de la résorcine ;<br>-Diminuer la section transversale des bois à coller ;<br>-Sabler les surfaces avant le collage |
| Bois poreux | Ayous (triplochyton scleroxylon) | -Colle absorbée par le bois,<br>-Risque de joint de faible épaisseur. | - Utiliser une colle visqueuse ou un mélange contenant une charge technique appropriée ;<br>-Observer un temps d'assemblage suffisant ;<br>-Augmenter le grammage de la colle ;<br>-Répandre la colle sur les deux faces à assembler |

### 2.1.2.4 Le module d'Elasticité des CP

Le module d'élasticité est un indicateur qui permet de renseigner de la rigidité des panneaux et sert de base pour le calcul de la flèche des panneaux travaillants. En fonction de la composition du panneau, la résistance à la flexion et le module d'élasticité peuvent être différents selon qu'il s'agit du sens longitudinal ou transversal. Des valeurs très élevées en module sens long peuvent être obtenues en ajustant la composition. Néanmoins, la moyenne des valeurs mesurées est une constante, caractéristique de l'essence ou des essences utilisées. Le module d'élasticité est également un indicateur important de la fiabilité des CP.

### 2.1.2.5 La rétractabilité du bois

Les retraits tangentiel et radial des bois tropicaux sont respectivement de l'ordre 7% à 4%, alors que le retrait longitudinal est de l'ordre de 1%. Au cours du séchage, le gradient d'humidité qui en découle génère des différences de retrait suivant les différentes directions. Ceci dit plus la différence de rétractabilité est considérable, plus les contraintes internes induites sont importantes.

### 2.1.2.6 La durabilité naturelle ou conférée

La résistance intrinsèque d'une essence de bois aux agents biologiques de dégradation tels que les champignons, les insectes et les termites au cours d'une période donnée est appelée « durabilité naturelle » ou « résistance naturelle » (Wong *et al*., 2005). Cette définition est en général restreinte au duramen des bois arrivés à maturité et étendue à l'utilisation du bois en milieu maritime (Fouquet, 2009). A la suite d'un traitement de préservation du bois, la durabilité est dite rapportée ou conférée. La prise en compte de la durabilité dans les structures en bois est très ancienne. Outre les goudrons, les premières recettes connues de peintures protectrices ont été inventées par les chantiers navals de l'ancienne marine à voile et à coque à bois. Des peintures à base de chaux ont dans un premier temps été utilisées. A l'époque de Christophe Colomb, on utilisait des enduits cireux constitués d'un mélange de poix, suif ou autre graisse avec de la cire d'abeille (IMO, 2002).

La base des données du Tropix 7.0 (2011) donne pour chaque type d'essence sa durabilité face aux différentes attaques.

Le critère de durabilité des bois est essentiel pour le développement de produits performants en termes de temps de fonctionnement et de la fiabilité mécanique. Pour les CP, selon les milieux d'utilisation, on les classe en trois catégories comme l'indique le tableau 2.2 :

*Tableau 2.2 : classes d'emploi du bois en fonction des conditions d'exposition (EN 335-1, 2007)*

| Classe d'emploi | Situation du bois | Humidité en situation | Risques biologiques encourus | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Champignon | Insecte | Termites |
| 1 | - A l'intérieur<br>- Au sec | Toujours<br>< 20%: | Non | Oui | Possible |
| 2 | - A l'intérieur<br>- Au sec ou sous abri<br>- Non exposé aux intempéries<br>- Risque d'humidification ambiante élevée, occasionnelle mais non persistante | < 20 % mais très occasionnellement supérieur | Oui (superficielle) | Oui | Oui |
| 3 | - A l'extérieur<br>- Au-dessus du sol<br>- Exposé aux intempéries (durée limitée)<br>- Séchage entre ces périodes | < 20 % mais occasionnellement supérieur | Oui | Oui | Oui |

Ainsi, l'utilisation d'une essence de bois non durable pour une classe d'emploi 3 met en danger l'intégrité structurale du produit tout en diminuant ses performances en service (changement d'aspect, baisse de la durée en service). En outre, les conditions de chaleur et d'humidité qui caractérisent les régions tropicales sont très favorables au développement des agents de dégradation du bois au cours du cycle exploitation – transformation – mise en service (Fouquet, 2009 ; Wong *et al*., 2005).

Les essences de faible durabilité n'acceptent pas toutes des traitements chimiques de préservation. Des comportements réfractaires aux traitements à haute pression sont observés dans certains cas (Wong *et al.*, 2000). L'aiélé (*canarium schweinfurthii*) par exemple, est à la fois non résistant aux champignons et non imprégnable (CIRAD, 2011). L'utilisation d'une essence naturellement durable ne nécessite aucune action additionnelle en termes de traitements de préservation pour un nombre considérable d'années.

### 2.1.3 Critère socio-économique : utilisation et commerce des produits forestiers non ligneux

Certaines essences ligneuses sont créditées d'une importante valeur sur les plans économique, social et culturel, concernant leur utilisation non ligneuse. Au plan économique, l'exploitation et la vente des Produits Forestiers Non Ligneux (PFNL) fournissent des revenus non négligeables, en particulier pour les populations rurales et urbaines les plus vulnérables. Les PFNL désignent en général des biens d'origine biologique autres que le bois d'œuvre et dérivés des forêts (Ingram et *al*., 2012). Comme exemple, on peut citer les écorces d'arbres, l'huile des fruits des essences comme le moabi (*baillonella toxisperma).* En Afrique centrale, 65 millions de personnes vivent à l'intérieur ou à proximité des forêts (Tchatat et Ndoye, 2006). Les PFNL constituent donc pour ces populations des ressources vitales (Paumgarten et Shackleton 2009). Le tableau 2.3

présente quelques exemples d'utilisation non ligneuse de certaines essences de bois. Au plan social, plusieurs espèces arboricoles sont sources de conflits entre les populations locales et les industriels des bois tropicaux du BC, du fait de leur utilisation multiple. C'est le cas du moabi qui a connu une forte baisse de prélèvement de l'huile comestible issue de ses fruits dans plusieurs concessions forestières camerounaises (Schneemann, 1995). On peut également citer le sapelli (*entandrophragma cylindricum*) et l'ayous (Karsenty et Gourlet-Fleury, 2006).

Sur le plan culturel, le bubinga (*guibourtia demeusei)* par exemple est considéré dans certaines localités de l'Est du Cameroun comme une divinité permettant de résoudre les problèmes difficiles (MINFOF 2008, Plan d'Aménagement des UFA 10.030 et 10.031).

*Tableau 2.3 : Exemples d'utilisation alternative de certaines essences ligneuses dans le bassin du Congo*

| **Essences de bois** | **Partie de l'arbre utilisée** | **Usages** | **Sources** |
|---|---|---|---|
| Moabi | fruits et écorces médecine, | Alimentation/médecine | Tchatat et Ndoye, 2006 |
| Ilomba | tiges médecine | alimentation | Tchatat et Ndoye, 2006 |
| Aiélé | fruits | alimentation | Tchatat et Ndoye, 2006 |
| Sapelli | Ecorces | médecine | MINFOF, 2008 |

Douze critères ont été identifiés et la pertinence de leur choix a été justifiée. Ces critères permettent de prendre en compte les préoccupations des principaux acteurs des produits tropicaux d'ingénierie du bois et intègrent au mieux les exigences de gestion durable des forêts tropicales équatoriales. L'étape suivante consiste à présenter les actions potentielles (essences de bois) sur lesquelles les choix seront faits.

## 2.2 Présentation de l'ensemble des choix et de la structure de préférence des essences de bois.

L'ensemble des choix désigne l'ensemble des actions, plus précisément l'ensemble des essences de bois sur lesquelles la sélection multicritère sera effectuée. Il a été défini en synthétisant les renseignements contenus dans diverses bases de données disponibles. L'échelle d'analyse concerne la partie camerounaise de la forêt du Bassin du Congo, consacrée à la production industrielle du bois d'œuvre. Elle couvre une superficie de plus de 7 millions d'hectares, et constitue un échantillon représentatif des forêts du BC (Mvogo, 2008 ; Oum et al., 2018).

L'analyse de 45 plans d'aménagement (Annexe 2.1) approuvés par le MINFOF des Unités Forestières d'Aménagement (UFA) a permis d'identifier dans un premier temps 122 espèces ligneuses exploitées au cours de la période 2000 à 2010 dans les différents espaces géographiques de la forêt de production. Ces espèces sont présentées en Annexe 2.2. Il a été possible de synthétiser les indicateurs des critères écologiques et socio-économico-culturels. Par la suite,

l'exploitation de la base de données Tropix 7.0 développée et régulièrement mise à jour par le CIRAD a permis de renseigner les propriétés technologiques (déroulabilité, module d'élasticité, rétractibilité, etc.) de 82 essences de bois. In fine, nous avons retenu exactement 82 espèces de bois pour lesquels chacun des 12 critères identifiés a été correctement renseigné.

Afin d'achever la spécification du problème multicritère et procéder à sa résolution, il est nécessaire de construire une structure de préférence des différents critères retenus. Elle permet d'évaluer la performance de chaque essence de bois selon le critère considéré. Elle est construite à partir d'un indicateur qui renseigne correctement le critère et qui permet de discriminer la performance de chaque action.

### 2.2.1 Statut de conservation

Nous avons choisi comme indicateur les catégories de la liste rouge de l'IUCN (figure 2.1). Ces catégories constituent un système simple et facile à comprendre pour classer les espèces qui risquent de s'éteindre à l'échelle mondiale. Elles ont acquis une reconnaissance internationale et sont largement utilisées dans toute une gamme de publications scientifiques, mais aussi par de nombreux acteurs de la conservation des espèces dans le monde (Gärdenfors *et al*., 2001 ; IUCN, 2012).

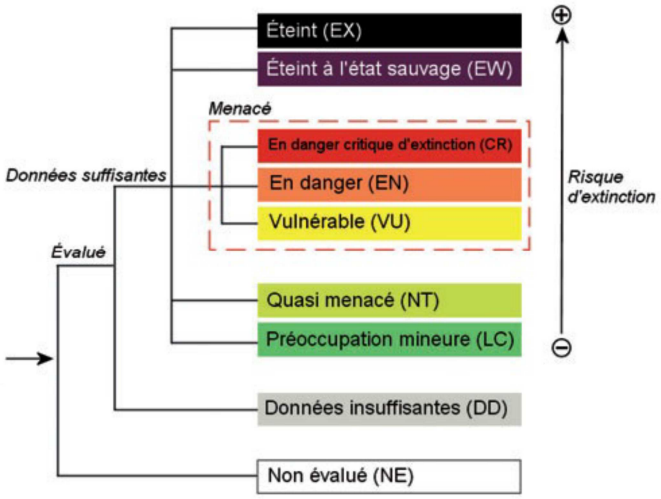



*Figure 2.1 : Structure des catégories de UICN version 3.1 (UICN, 2001).*

Les espèces classées dans la catégorie (CR : Danger Critique d'extinction) remplissent également les critères des catégories (VU : vulnérables) et (EN : En Danger). Celles de la catégorie (EN) remplissent également les critères de la catégorie (VU). Ces trois catégories entrent elles-mêmes dans le groupe «Menacé ». L'appartenance à une catégorie est déterminée par le taux de « disparition » des individus matures sur une période d'au moins 10 ans. Ce taux se situe respectivement à 80 %, 50% et au moins 20% pour les catégories (CR), (EN) et (VU).

L'exploitation de la base de données de l'UICN (2013) (http://www.iucnredlist.org/) nous a permis de déterminer la catégorie de chaque essence présélectionnée (tableau 2.4). Le principal facteur de risque qui justifie la menace d'extinction est la réduction de la population du fait du prélèvement intensif des individus matures et de la diminution de l'aire d'occupation de l'espèce.

*Tableau 2.4 : Statut de Conservation des essences présélectionnées (IUCN, 2013)*

| **Statut** | **Nom vernaculaire (dénomination scientifique)** |
|---|---|
| En danger critique d'extinction (CR) | Mukulungu (autranella conlensis) |
| En danger (EN) | Assamela/Afrormosia (pericopsis elata). Ebene (diospyros crassiflora). Izombe (testulea gabonensis). Makore/Douka (tieghemella heckelii). **Tola (gossweilerodendron balsamiferum)**. Wenge (millettia laurentii). Zingana/Amuk (microberlinia brazzavillensis). |
| Vulnérable (VU) | Abura/Bahia (Fleroya lerdermannii). **Acajou (khaya ivorensis).** Avodire (turraeanthus africanus). **Azobe/Bongossi (lophira alata).** Bilinga (nauclea diderrichii). Bodioa (anopyxis klaineana). Bosse (guarea thompsonii). Dibetou/Bibolo (lovoa trichiliodes). Doussie (afzelia pachyloba). Framire (terminalia ivorensis). Iatandza/Evouvouss (albizia ferruginea). Igaganga/Assa Mingoung (dacryodes igaganga). Kondroti (rhodognaphalon brevicuspe). **Kosipo (entandrophragma candollei).** Kotibe (nesogordonia papaverifera). Koto (pterygota macrocarpa). Moabi (baillonella toxisperma). **Okoume (Aucoumea klaineana)**. **Sapelli (entandrophragma cylindricum).** Sipo (entandrophragma utile). Tiama (entandrophragma angolense). |
| Quasi menacé (NT) | **Iroko (milicia excelsa)** |
| Préoccupation mineure (LC) | **Ayous/Obéché** (triplochiton scleroxylon). Bomanga/Ekop léké (brachystegia laurentii).<br>Naga/Ekop Naga (brachystegia cynometrioides). Pao rosa (bobgunnia fustiloides). |
| Non menacé (NC) | Abale/Essia (petersianthus macrocarpus). Afok ahié/Coula (Coula edulis). **Aiele (canarium schweinfurthii).** Ako (antiaris toxicaria). Akossika (scottellia klaineana). Alep (desbordesia glaucescens). **Aningre A (aningeria altissima).** Andoung (monopetalanthus letestui Pellegr). Angueuk (ongokea gore). **Aningre R (aningeria Robusta).** Awoura (julbernardia pellegriniana). Bete (mansonia altissima). Bongo H/Olon (Fagara heitzii). Bubinga (guibourtia demeusei). Dabema (piptadeniastrum africanum). Diana Z (Celtis Zenkeri). Difou (morus mesozygia). Ebiara (berlinia bracteosa). Ekaba (tetraberlinia bifoliolata). Ekoune (coelocaryon preussii). Emien (alstonia boonei). Etimoe (Copaifera mildbraedii). Eveuss (klainedoxa gabonensis). **Eyong (eribroma oblonga).** Faro mezili (daniella klainei). **Fraké / Limba (terminalia superba).** **Fromager (ceiba pentandra).** Gombe (didelotia africana). **Ilomba (pycnanthus angolensis).** Kanda (beilschmiedia spp). Kekele (holoptelea grandis). Landa (erythroxylum mannii). Lati (amphimas ferrugineus). Limbali (gilbertiodendron dewevrei). Longhi (gambeya africana). **Lotofa (sterculia rhinopelata).** Mambodé/Amouk (Detarium macrocarpum. Movingui (distemonanthus benthamianus). Nieuk (fillaeopsis discophora). Niove (staudtia kamerunensis). Oboto (mammea africana). Okan/Adoum (cylicodiscus gabonensis). **Onzabili (antrocaryon klaineanum).** Osanga (Pteleopsis hylodendron). Ovoga/ Angalé (poga oleosa). Ozigo (dacryodes buettneri). Padouk (pterocarpus soyauxii). Tali (erythropleum ivorense). Tchitola (oxystigma oxyphyllum). |

Note : Les essences en gras et soulignées sont celles qui sont actuellement utilisées pour la fabrication des CP.

## 2.2.2 Potentiel exploitable

Le potentiel exploitable est quantifié par le volume exploitable à l'hectare. Il a été estimé dans la partie camerounaise du Bassin du Congo, au terme de l'inventaire des ressources forestières

(FAO et MINFOF, 2005). La distribution des essences a été organisée en cinq catégories : très élevée, élevée, moyenne, faible et très faible (tableau 2.5).

*Tableau 2.5 : Potentiel exploitable des essences présélectionnées (FAO et MINFOF, 2006).*

| **Classification** | **Volume exploitable à l'hectare (m3/ ha)** | **Nom vernaculaire** |
|---|---|---|
| Très élevée | ≥ 2 | **Ayous/Obéché**. **Azobé/Bongossi**. Dabéma/Atui. Diana Z. Alep. Emien. **Eyong**. **Fraké/Limba**. **Fromager/seba**. Gombé. **Ilomba**. Kanda. Kekele. Limbali. **Lotofa / Nkanang**. Niové. Padouk rouge. **Sapelli**. Tali. |
| Elevée | [1 – 2[ | Alep. Dabema. **Fromager**. Bété/Mansonia. Abale/Essia. Assamela/Afromosia. Dibétou/Bibolo. Difou. Eveuss/Ngon. Framiré. **Kosipo**. Koto. Movingui. Okan/Adoum. **Onzabili K/Angongui** |
| Moyenne | [0.5 – 1[ | **Aiélé/Abel**. Abura/Bahia. Angueuk. Avodire. Bilinga. Bodioa. Bomanga/Ekop léké. Bongo H/Olon. Bossé foncé. Eben. Ebiara yaoundé/Abem. Iatandza/Evouvouss. **Iroko**. Kotibé. Landa. Lati/Edjil. Longhi/Abam. Mambodé/Amouk. Nieuk/Eyek. Osanga. Sipo |
| Faible | [0.25 – 0.5[ | Akossika. **Acajou blanc**. Andoung brun. **Aningré A.** Awoura/Ekop beli. Ekaba. Etimoe. Moabi. Ozigo. Pao rosa. Tchitola. Tiama/Ebeka. **Tola**. Zingana / Amuk. |
| Très faible | < 0.02 | Afok ahié/Coula. Ako/Aloa. Bubinga Rouge/oveng ossé. Doussié blanc/Pachyloba. Ekouné. Faro mezili. Igaganga/Assa Mingoung. Izombe. Kondroti. Makoré/Douka. Mukulungu. Naga/Ekop Naga. Oboto/Abotzok. **Okoume**. Ovoga/Angalé.Wengé |

Note : Les essences en gras et soulignées sont celles qui sont actuellement utilisées pour la fabrication des CP.

### 2.2.3 Potentiel de régénération naturelle après récolte

Le taux de reconstitution R d'une essence, correspondant à une aire de production ligneuse A d'une UFA, est généralement estimé à partir de la formule proposée par Durrieu de Madron et al. (1998).

$$R = 100\ x\ \frac{N_0(1-\delta)(1-\alpha)^n}{N_1} \qquad \textit{(eq 2.3)}$$

Avec : - $N_0$ : nombre d'individus dont le diamètre est inférieur au DME au démarrage de la récolte, et qui passeront au-dessus du DME au terme de la durée du cycle d'exploitation forestière ;

- n : durée du cycle d'exploitation, fixé à 30 ans (MINEF, 2001) ;

- α est le taux annuel de mortalité, situé à 1 % ;

- $\delta$ est le taux de destruction des individus au cours de la récolte, fixé à 7% (MINEF, 2001) ;

- $N_1$ : nombre d'individus dont le diamètre est supérieur au DME au début de l'exploitation.

Pour chaque essence i, nous avons adopté l'indicateur de régénération naturelle Gi sur la surface investiguée qui est défini par (Oum, 2014) :

$$G_i = \frac{\sum R_j A_j}{\sum \mu_j A_j} \qquad \textit{(eq 2. 4)}$$

Où $\mu_j$ vaut 1 si l'essence est exploitée dans l'aire $A_j$ et 0 si elle ne l'est pas et $R_j$ le taux de régénération sur l'air $A_j$. Etant donné que le taux minimal de renouvellement imposé est de 50 %, la préférence a été organisée de la façon suivante :

Bon : Gi ≥ 100% ; Assez bon: 75% ≤ Gi < 100 % et Passable : 50 % ≤ Gi < 75 % ; mauvais : Gi < 50 %.

En supposant qu'une essence de bois présente un taux de renouvellement de 50 % à chaque rotation, au terme de la seconde rotation, son renouvellement se situera à 25 %. Ce qui indique un déclin imminent de cette essence et fait apparaitre dans un premier temps comme sévère la structure de sélection choisie. Les résultats sont récapitulés dans le tableau 2.6.

*Tableau 2.6 : Classification des essences de bois selon le potentiel de régénération naturelle après abattage (source: nos investigations)*

| **Classification** | **Nom vernaculaire** |
|---|---|
| Bonne | Abura/Bahia. **Acajou blanc**. Afok ahié/Coula. **Aiélé/Abel**. Ako/Aloa. Akossika. **Aningré A. Aningré R.** Assamela/Afromosia. Awoura/Ekop beli. **Ayous/Obéché**. Bété/Mansonia. Bongo H/Olon. Bubinga Rouge/oveng ossé. Diana Z. Dibétou/Bibolo. Difou. Doussié blanc/Pachyloba. Eben. Ebiara yaoundé/Abem. Ekouné . Eveuss /Ngon. Framiré. **Fromager/seba**. Gombé. **Ilomba**. Kanda. Kotibé. Koto. Landa. Limbali. Longhi/Abam. **Lotofa/Nkanang**. Mambodé/Amouk. Naga/Ekop Naga. Nieuk/Eyek. Niové. Oboto/Abotzok. **Okoume**. **Onzabili K /Angongui.** Ozigo. Pao rosa. Tali. Tiama/Ebeka. |
| Assez bonne | Abale/Essia. Angueuk. Avodire. Bilinga. Bomanga/Ekop léké. Bossé foncé. Dabéma/Atui. Etimoe. **Eyong.** Igaganga/Assa Mingoung. Mukulungu. Ovoga/Angalé. Tchitola. **Tola**. |
| Passable | Alep. Andoung brun. Ekaba. Emien. Faro mezili. **Fraké/Limba**. Iatandza/Evouvouss. **Iroko**. Izombe. Kondroti. Lati/Edjil. Makoré/Douka. Moabi Movingui. Osanga. Padouk rouge. **Sapelli**. Sipo. |
| Mauvaise | **Azobé/Bongossi**. Bodioa. Kekele. **Kossipo/Kosipo**. Okan/Adoum. Wengé. Zingana/Amuk |

Note : Les essences en gras et soulignées sont celles qui sont actuellement utilisées pour la fabrication des CP.

## 2.2.4 La déroulabilité

L'indicateur choisi ici la dureté de Monnin (D). Elle permet de déterminer la difficulté de la dérouleuse à découper les billons. De façon générale, plus un bois est tendre plus il est facile à dérouler. La distribution des essences a été organisée en trois catégories : bon, moyen, faible (tableau 2.7) et la préférence est organisée de la manière suivante :

Bon : D ≤ 6 : bois très tendre, tendre à mi-dur ; Moyen : 6 < D ≤ 9: bois dur ;

Faible : D > 9: bois très dur

*Tableau 2.7 : Classification des essences de bois selon l'aptitude au déroulage (Tropix 7.0)*

| Classification | Nom vernaculaire |
|---|---|
| Bonne | **Ayous/Obéché**. Emien. **Ilomba**. Kondroti. Ako/Aloa. **Aiélé/Abel**. **Fromager/seba**. Ekouné. Ekaba. Bongo H/Olon. Bomanga/Ekop léké. Tchitola. Avodire. **Aningré A**. Koto. **Onzabili K/Angongui**. Landa. Sipo. Gombé. Andoung brun. Ozigo. Ovoga/Angalé. **Tola**. Faro mezili. Nieuk/Eyek. Framiré. **Okoume**. **Fraké/Limba**. Abura/Bahia. **Acajou blanc**. Dibétou/Bibolo. Tiama/Ebeka |
| Moyenne | Kanda. Awoura/Ekop beli. **Eyong**. Limbali. **Lotofa/Nkanang**. Angueuk. Dabéma/Atui. Lati/Edjil. Longhi/Abam. Oboto/Abotzok. Zingana/Amuk. Iatandza/Evouvouss. **Iroko**. Bété/Mansonia. Etimoe. Akossika. Kekele. Ebiara yaoundé/Abem. Izombe. Bossé foncé. Naga / Ekop Naga. Igaganga/Assa Mingoung. Movingui. **Sapelli**. Mambodé/Amouk. Bilinga. Abale/Essia. Kotibé. Makoré/Douka. **Kossipo/Kosipo** |
| Difficile | Bodioa. Moabi. Doussié blanc/Pachyloba. Padouk rouge. Niové. Diana Z. Afok ahié/Coula. Eben. Mukulungu. Assamela/Afromosia. Osanga. Pao rosa. Wengé. Okan/Adoum. Bubinga Rouge/oveng ossé. Alep. Eveuss /Ngon. **Azobé/Bongossi**. Difou. Tali |

Note : Les essences en gras et soulignées sont celles qui sont actuellement utilisées pour la fabrication des CP.

## 2.2.5 Le contrefil

L'indicateur ici est défini par la disposition des fils de l'essence considérée par rapport à leur orientation idéale rectiligne dans l'axe longitudinal du billon. La préférence est définie comme suit : Bon pour les essences n'ayant pas de contre fil ou de contre fil léger ; Moyen pour celles qui ont des contre fils moyens et Faible pour celles à contre fil accusé. Les résultats de la catégorisation sont donnés dans le tableau 2.8.

*Tableau 2.8 : Classification des dispositions des contrefils des 82 essences présélectionnées. (Tropix 7.0)*

| Classification | Nom vernaculaire |
|---|---|
| Bonne | Ovoga/Angalé. Ekouné. Emien. Bété/Mansonia. Niové. Kanda. Bodioa. **Ilomba**. Alep. Wengé. Lati/Edjil. Difou. Doussié blanc/Pachyloba. **Kossipo/Kosipo**. **Tola**. Ekaba. Bongo H/Olon. Awoura/Ekop beli. Bomanga/Ekop léké. Etimoe. Kotibé. Tchitola. **Eyong**. Avodire. **Aningré A**. Akossika. Diana Z. kekele. Kondroti. Afok ahié/Coula. Eben. Mukulungu. Okan/Adoum. Assamela/Afromosia. Limbali. **Lotofa/Nkanang**. Framiré. Ebiara yaoundé/Abem. Longhi/Abam. **Okoume**. Faro mezili. Koto. **Onzabili K/Angongui**. Angueuk. Bubinga Rouge/oveng ossé. Izombe. **Fraké/Limba**. Abura/Bahia. Padouk rouge. Moabi. **Ayous/Obéché**. Iatandza /Evouvouss. **Iroko**. Oboto / Abotzok. Bossé foncé. Naga/Ekop Naga. Zingana/Amuk. Igaganga/Assa Mingoung. Pao rosa. Landa. Sipo. Movingui. **Acajou blanc**. Dibétou/Bibolo. Ako/Aloa. **Fromager/seba**. **Sapelli** |
| Moyenne | Eveuss/Ngon. Osanga. Mambodé/Amouk. Makoré/Douka |
| Faible | Bilinga. Dabéma/Atui. Abale/Essia. Gombé.Ozigo. Tali. **Azobé/Bongossi**. Nieuk/Eyek. Andoung brun. Tiama/Ebeka. **Aiélé/Abel** |

Note : Les essences en gras et soulignées sont celles qui sont actuellement utilisées pour la fabrication des CP.

## 2.2.6 Le collage traditionnel

Sur la base des renseignements collectés dans la base de données TROPIX 7.0, trois catégories d'aptitude au collage traditionnel ont été définies : « bon », « difficile », « mauvais ».

Sur le plan normatif européen, le collage est jugé satisfaisant quand les résultats d'essais pratiqués sur les joints de colle remplissent les conditions suivantes :

- un taux de délamination n'excédant pas 10 % (EN 302-2, 2004) ;

- des contraintes ultimes en cisaillement par compression compatibles avec des niveaux bien définis de taux de rupture dans le bois (EN 392, 1995 ; EN 386).

Les essences de bois dont le collage nécessite des opérations supplémentaires (tableau 2.9), pour satisfaire aux exigences de performances sont classées dans la catégorie « difficile ». Lorsque ces difficultés sont sévères, rendant ainsi les opérations de collages insatisfaisantes, l'aptitude au collage est identifiée par la catégorie « mauvais ». Tel est le cas du wengé (millettia laurentii).

*Tableau 2.9 : Classification d'aptitude au collage des 82 essences présélectionnées (CIRAD 2011).*

| Classification | Nom vernaculaire |
|---|---|
| Bonne | Abura/Bahia. **Acajou blanc**. Afok ahié/Coula. **Aiélé / Abel**. Ako / Aloa. Akossika. Andoung brun. Angueuk **Aningré A**. Avodire. Awoura/Ekop beli. Bété / Mansonia. Bilinga. Bodioa. Bomanga/Ekop léké. Bongo H/Olon. Bubinga Rouge/oveng ossé. Dabéma/Atui. Diana Z. Dibétou/Bibolo. Difou. Eben. Ebiara yaoundé/Abem. Ekaba. Ekouné. Emien. Etimoe. **Eyong**. **Fraké/Limba**. **Fromager/seba**. Gombé. Iatandza/Evouvouss. Igaganga/Assa Mingoung. **Ilomba**. **Iroko**. Izombe. Kanda. Kekele. Kondroti. **Kossipo/Kosipo**. Koto. Landa. Lati/Edjil. Limbali Longhi/Abam **Lotofa/Nkanang** Mambodé/Amouk. Movingui. Mukulungu. Naga/Ekop Naga. Nieuk/Eyek. Niové. Oboto/Abotzok. Okan/Adoum. **Okoume**. **Onzabili K/Angongui**. Osanga. Ovoga/Angalé. Padouk rouge. **Sapelli**. Sipo. Tali. Tchitola. Tiama/Ebeka. **Tola**. Zingana/Amuk |
| Difficile | Assamela/Afromosia. Alep. **Ayous/Obéché**. **Azobé/Bongossi**. Bossé foncé. Bubinga. Doussié blanc/Pachyloba. Faro mezili. Framire. kotibe. Makoré/Douka. Moabi. Ozigo. Pao rosa. Tchitola. **Tola**. |
| Mauvaise | Abale/Essia. Eveuss. Wenge. |

Note : Les essences en gras et soulignées sont celles qui sont actuellement utilisées pour la fabrication des CP.

## 2.2.7 La rétractabilité

L'indicateur de la rétractibilité du bois est le coefficient de retrait (RT). La préférence est organisée de la manière suivante et les résultats de la catégorisation sont donnés dans le tableau 2.10 :

Bon : $RT \leq 4\%$ ; Moyen : $4 < RT \leq 5{,}5\%$ ; Insuffisant : $RT > 5{,}5\%$

*Tableau 2.10 : Classification d'aptitude à la rétractabilité des 82 essences présélectionnées (CIRAD 2011).*

| Classification | Nom vernaculaire |
|---|---|
| Bonne | Ovoga/Angalé. Difou. Doussié blanc/Pachyloba. **Tola**. Assamela/Afromosia. Faro mezili. Padouk rouge. **Ayous/Obéché**. Iatandza/Evouvouss. **Iroko**. **Fromager/seba**. Nieuk/Eyek |
| Moyenne | Ekouné. Emien. Bété/Mansonia. Niové. Kanda. **Ilomba**. **Kossipo/Kosipo**. Ekaba. Bongo H/Olon. Awoura/Ekop beli. Bomanga/Ekop léké. Etimoe. Tchitola. **Eyong**. Avodire. **Aningré A**. Akossika. Diana Z. kekele. Kondroti. Afok ahié/Coula. Limbali. **Lotofa / Nkanang**. Framiré. Ebiara yaoundé/Abem. **Okoume**. Koto. **Onzabili K/Angongui.** Angueuk. Izombe. **Fraké/Limba**. Abura/Bahia. Bossé foncé. Naga/Ekop Naga. Igaganga/Assa. Mingoung. Pao rosa. Landa. Sipo. Movingui. **Acajou blanc**. Dibétou/Bibolo. Ako/Aloa. **Sapelli**. Osanga. Mambodé/Amouk. Bilinga. Dabéma/Atui. Abale/Essia. Gombé. Andoung brun. Tiama/Ebeka |
| Mauvaise | Bodioa. Wengé. Lati/Edjil. Kotibé. Okan/Adoum. Longhi/Abam. Bubinga. Rouge/oveng ossé. Moabi. Oboto/Abotzok. Makoré/Douka. Ozigo. Tali. **Aiélé/Abel**. Alep. Eben. Mukulungu. Zingana/Amuk. Eveuss/Ngon **Azobé/Bongossi** |

Note : Les essences en gras et soulignées sont celles qui sont actuellement utilisées pour la fabrication des CP.

## 2.2.8 Module d'élasticité du bois

L'indicateur de la résistance du bois est le module d'élasticité. La préférence est organisée de la manière suivante : Bon pour les modules $E > 15\,000$ MPa , Moyen pour $7000 < E \leq 15\,000$ et Faible pour $E \leq 7000$. Les résultats de la catégorisation sont donnés dans le tableau 2.11.

*Tableau 2.11 : Classification des 82 essences présélectionnées en fonction de la valeur du module d'élasticité (CIRAD 2011).*

| Classification | Nom vernaculaire |
|---|---|
| Bonne | Pao rosa. Bodioa. Wengé. Okan/Adoum. Bubinga. Rouge/oveng ossé. Moabi. Alep. Eveuss/Ngon. **Azobé/Bongossi**. Difou. Doussié blanc/Pachyloba. Padouk rouge. Niové. Kanda. Awoura/Ekop beli. **Eyong**. Diana Z. Afok ahié/Coula. Limbali. **Lotofa/Nkanang**. Angueuk. Dabéma/Atui. Lati / Edjil. Longhi/Abam. Oboto/Abotzok. Tali. Eben. Mukulungu. Zingana/Amuk |
| Moyenne | Assamela/Afromosia. Iatandza/Evouvouss. **Iroko**. Ekouné. Bété/Mansonia. Ekaba. Bongo H/Olon. Bomanga/Ekop léké. Etimoe. Tchitola. Avodire. **Aningré A**. Akossika. Kekele. Ebiara yaoundé/Abem. Koto. **Onzabili K/Angongui**. Izombe. Bossé foncé. Naga/Ekop Naga. Igaganga/Assa Mingoung. Landa. Sipo. Movingui. **Sapelli**. Osanga. Mambodé/Amouk. Bilinga. Abale/Essia. Gombé. Andoung brun. Kotibé. Makoré/Douka. Ozigo. Ovoga/Angalé. **Tola**. Faro mezili. **Ayous/Obéché**. Nieuk/Eyek. Emien. **Ilomba**. **Kossipo/Kosipo**. Kondroti. Framiré. **Okoume**. **Fraké/Limba**. Abura/Bahia. **Acajou blanc**. Dibétou/Bibolo. Ako/Aloa. Tiama/Ebeka. **Aiélé/Abel**. |
| Mauvaise | **Fromager/seba** |

Note : Les essences en gras et soulignées sont celles qui sont actuellement utilisées pour la fabrication des CP.

### 2.2.9 Durabilité naturelle ou conférée

La norme EN 335-1 *(Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois – Définition des classes d'emploi - Partie 1 : Généralités)* définit 3 classes d'emploi, essentiellement fondées sur les conditions d'environnement dans les zones tempérées et présentées dans le tableau 2.2. Les CP à usage intérieur ou extérieur fonctionnent dans les classes d'emploi 1, 2 et 3. Ils sont donc soumis à trois types d'agents biodégradant du bois : les champignons, les insectes et les termites. Les champignons colonisent le bois par l'intermédiaire du mycélium (partie végétative des champignons, composée d'un ensemble de filaments plus ou moins ramifiés) qui se développe dans les vides cellulaires des fibres ou vaisseaux et qui peut s'étendre sur tout le plan ligneux. L'invasion se poursuit généralement par une perforation de la paroi cellulaire à l'aide d'enzymes. Leurs attaques sont souvent profondes et irréversibles pour les propriétés mécaniques, la dureté et la couleur des bois mis en œuvre.

Dans les régions équatoriales et tropicales humides, les champignons de pourriture brune se développent rapidement et sont parfois très virulents, surtout pour les essences exposées à l'extérieur. Ils attaquent la cellulose du bois, et on note une perte rapide des propriétés mécaniques du bois qui présente alors un aspect friable, brun foncé, avec des fractures en quadrillage. Les coléoptères vident les sciures du bois et les rejettent à l'extérieur, au fur et à mesure du percement. Leurs attaques se présentent sous forme d'une auréole noirâtre à la surface du bois. Les termites attaquent le bois d'œuvre dégradé par les champignons après plusieurs mois de stockage. Ils se nourrissent exclusivement de cellulose et vivent en grande majorité dans les forêts humides.

La pertinence de l'emploi d'une essence de bois dans un environnement donné est évaluée dans ce travail en combinant :

- la résistance intrinsèque aux agents biodégradant cités ci-dessus ;

- la classe de service considérée, qui traduit le niveau d'agressivité des agents de dégradation du bois dont le développement est particulièrement favorable en milieu tropical (Fouquet, 2009) ;

- l'aptitude d'une essence à accepter un traitement de préservation. L'application d'un traitement de préservation, permettra aux essences imprégnables des classes « Moyenne » et « Faible » d'améliorer la préférence des dites essences.

Nous définissons trois classes de durabilité dans ce travail : « haute », « moyenne » et « faible » pour chaque type d'attaque comme l'indiquent les tableaux 2.12, 2.13 et 2.14 :

*Tableau 2.12 : Classification des 82 essences présélectionnées en fonction de leur résistance intrinsèque aux insectes (CIRAD 2011).*

| Classification | Nom vernaculaire / Usage 1 | Nom vernaculaire / Usage 2 et 3 |
|---|---|---|
| Bonne | Afok ahié/Coula. Bété/Mansonia. Difou. Doussié blanc/Pachyloba. Eben. Eveuss /Ngon. Niové. Pao rosa. Tali. Bilinga. Mukulungu. Alep. Makoré/Douka. Padouk rouge. Okan/Adoum; Assamela/Afromosia. Bubinga Rouge/oveng ossé. Kanda. Landa. Oboto/Abotzok. Angueuk. Iatandza/Evouvouss. **Iroko**. Izombe. **Azobé/Bongossi**. Wengé. Mambodé/Amouk. Dabéma/Atui. Ovoga/Angalé. Ekaba. Longhi /Abam. Nieuk/Eyek. **Fraké/Limba**. **Aningré A**. Abura/Bahia. Ako/Aloa. Akossika. Diana Z. Ekouné. **Fromager/seba**. **Ilomba**. Koto. **Onzabili K /Angongui**. Andoung brun. Emien. Kondroti. Bodioa. Kekele. Limbali. **Lotofa/Nkanang**. **Kossipo/ Kosipo**. Awoura/Ekop beli. Ebiara yaoundé/Abem. Naga/Ekop Naga. Abale/Essia. Bomanga/Ekop léké. Etimoe. **Sapelli**. Zingana/Amuk. Gombé. **Okoume**. Sipo. Movingui. Bossé foncé. **Acajou blanc**. Bongo H/Olon. Faro mezili. **Tola**. **Ayous/Obéché**. Ozigo. Igaganga/Assa Mingoung | Afok ahié/Coula. Bété/Mansonia. Difou. Doussié blanc/Pachyloba. Eben. Eveuss /Ngon. Niové. Pao rosa. Tali. Bilinga. Mukulungu. Alep. Makoré/Douka. Padouk rouge. Okan/Adoum. Assamela/Afromosia. Bubinga Rouge/oveng ossé. Kanda. Landa. Oboto/Abotzok. Angueuk. Iatandza / Evouvouss. **Iroko**. Izombe. **Azobé/Bongossi**. Wengé. Mambodé/Amouk. Dabéma/Atui. Ovoga/Angalé. Ekaba. Longhi /Abam. Nieuk/Eyek. **Fraké/Limba**. **Aningré A**. Abura/Bahia. Ako/Aloa. Akossika. Diana Z. Ekouné. **Fromager/seba**. **Ilomba**. Koto. Onzabili K /Angongui. Andoung brun. Emien. Kondroti. Bodioa. Kekele. Limbali. **Lotofa/Nkanang**. **Kossipo/ Kosipo**. Awoura/Ekop beli. Ebiara yaoundé/Abem. Naga/Ekop Naga. Abale/Essia. Bomanga/Ekop léké. Etimoe. **Sapelli**. Zingana/Amuk. Gombé. Okoume. Sipo. Movingui. Bossé foncé. **Acajou blanc**. Bongo H/Olon. Faro mezili. Tola. **Ayous**. Ozigo. Igaganga Mingoung |
| Moyenne | Kotibé. Tchitola. Moabi. Osanga. Tiama/Ebeka. Dibétou / Bibolo. **Eyong**. | |
| Mauvaise | Lati/Edjil. Framiré. Avodire. **Aiélé/Abel** | Kotibé. Tchitola. Moabi. Osanga. Tiama/Ebeka. Dibétou/Bibolo. **Eyong**. Lati/Edjil. Framiré. Avodire. **Aiélé/Abel** |

Note : Les essences en gras et soulignées sont celles qui sont actuellement utilisées pour la fabrication des CP.

*Tableau 2.13 : Classification des 82 essences présélectionnées en fonction de leur résistance intrinsèque aux termites (CIRAD 2011).*

| Classification | Nom vernaculaire / Usage 1 | Nom vernaculaire / Usage 2 et 3 |
|---|---|---|
| Bonne | Afok ahié/Coula. Bété/Mansonia. Difou. Doussié blanc/Pachyloba. Eben. Eveuss /Ngon. Niové. Pao rosa. Tali. Bilinga. Mukulungu. Alep. Makoré/Douka. Padouk rouge. Okan / Adoum. Assamela/Afromosia. Bubinga Rouge/oveng ossé. Kanda. Landa. Oboto/Abotzok. Angueuk. Iatandza/Evouvouss. **Iroko**. Izombe. **Azobé/Bongossi**. Wengé. Mambodé/Amouk. Dabéma/Atui. Ovoga/Angalé. Ekaba. Longhi /Abam. Nieuk/Eyek. **Fraké/Limba**. **Aningré A**. Abura/Bahia. Ako/Aloa. Akossika. Diana Z. Ekouné. **Fromager/seba**. **Ilomba**. Koto. **Onzabili K /Angongui**. Andoung brun. Emien. Kondroti. Bodioa. Kekele. Bongo H / Olon. Faro mezili. Limbali. **Lotofa/Nkanang**. **Kossipo/Kosipo**. Awoura/Ekop beli. Ebiara yaoundé/Abem. Naga/Ekop Naga. Abale/Essia. Bomanga/Ekop léké. Etimoe. **Sapelli**. Zingana/Amuk. Gombé. **Okoume**. **Tola**. **Ayous/Obéché**. Ozigo. Igaganga/Assa Mingoung. Kotibé. Tchitola. | Afok ahié/Coula. Bété/Mansonia. Difou. Doussié blanc/Pachyloba. Eben. Eveuss /Ngon. Niové. Pao rosa. Tali. Bilinga. Mukulungu. Alep. Makoré/Douka. Padouk rouge. Okan / Adoum. Assamela/Afromosia. Bubinga Rouge/oveng ossé. Kanda. Landa. Oboto/Abotzok. Angueuk. Iatandza/Evouvouss. **Iroko**. Izombe. **Azobé/Bongossi**. Wengé. Mambodé/Amouk. Dabéma/Atui. Ovoga/Angalé. Ekaba. Longhi /Abam. Nieuk/Eyek. **Fraké/Limba**. **Aningré A**. Abura/Bahia. Ako/Aloa. Akossika. Diana Z. Ekouné. **Fromager/seba**. **Ilomba**. Koto. **Onzabili K /Angongui.** Andoung brun. Emien. Kondroti. Bodioa. Kekele. Bongo H/Olon. Faro mezili. Limbali. **Lotofa/Nkanang**. **Kossipo/Kosipo**. Awoura/Ekop beli. Ebiara yaoundé/Abem. Naga/Ekop Naga. Abale/Essia. Bomanga/Ekop léké. Etimoe. **Sapelli**. Zingana/Amuk. Gombé. **Okoume**. **Tola**. **Ayous.** Ozigo. Igaganga/Assa Mingoung |
| Moyenne | Sipo. Movingui. Moabi. Osanga. Tiama/Ebeka. Dibétou/Bibolo. **Eyong**. Lati/Edjil | Kotibé. Tchitola. |
| Mauvaise | Bossé foncé **Acajou blanc**. Framiré. Avodire. **Aiélé/Abel** | Bossé foncé **Acajou blanc**. Framiré. Avodire. **Aiélé/Abel**. Sipo. Movingui. Moabi. Osanga. Tiama/Ebeka. Dibétou/Bibolo. **Eyong**. Lati/Edjil |

Note : Les essences en gras et soulignées sont celles qui sont actuellement utilisées pour la fabrication des CP.

En classe d'usage 1, on note l'absence totale d'humidité, ce qui fait que toutes les essences sont potentiellement bonnes vis-à-vis des champignons. De ce fait, le tableau 2.14 ne ressort que les essences à usage en classe 2 et 3.

*Tableau 2.14 : Classification des 82 essences présélectionnées en fonction de leur résistance intrinsèque aux champignons(CIRAD 2011).*

| Classification | Nom vernaculaire / Usage 2 | Nom vernaculaire / Usage 3 |
|---|---|---|
| Bonne | Afok ahié/Coula. Bété/Mansonia. Difou. Doussié blanc/Pachyloba. Eben. Eveuss /Ngon. Niové. Pao rosa. Tali. Bilinga. Mukulungu. Alep. Makoré/Douka. Padouk rouge. Okan / Adoum. Moabi. Assamela/Afromosia. Bubinga Rouge/oveng ossé. Kanda. Landa. Oboto/Abotzok. Angueuk. Iatandza/Evouvouss. **Iroko**. Izombe. **Azobé/Bongossi**. Wengé. Limbali. **Lotofa/ Nkanang**. Osanga. Bossé foncé. Kossipo / Kosipo. **Tola**. Sipo. Framiré. Mambodé/Amouk. Dabéma/Atui. Ovoga /Angalé. Ekaba. Bongo H / Olon. Awoura/Ekop beli. Ebiara yaoundé/Abem. Naga/Ekop Naga. Abale/Essia. Bomanga/Ekop léké. Etimoe. **Sapelli**. Zingana/Amuk. Kotibé. Tchitola. Movingui. Tiama/Ebeka. Lati/Edjil. **Acajou blanc** | Afok ahié/Coula. Bété/Mansonia. Difou. Doussié blanc/Pachyloba. Eben. Eveuss /Ngon. Niové. Pao rosa. Tali. Bilinga. Mukulungu. Alep. Makoré/Douka. Padouk rouge. Okan / Adoum. Moabi. Assamela/Afromosia. Bubinga Rouge/oveng ossé. Kanda. Landa. Oboto/Abotzok. Angueuk. Iatandza/Evouvouss. **Iroko**. Izombe. Azobé/Bongossi. Wengé. Limbali. **Lotofa/Nkanang**. Osanga. Bossé foncé |
| Moyenne | Dibétou/Bibolo. Longhi/Abam. **Onzabili K /Angongui**. Nieuk/Eyek. Gombé. **Ilomba**. **Okoume**. **Eyong**. Avodire. **Aningré A**. Faro mezili. | **Kossipo/Kosipo**. **Tola**. Sipo. Framiré. Mambodé/Amouk. Dabéma/Atui. Ovoga/Angalé. Ekaba. Bongo H/Olon. Awoura/Ekop beli. Ebiara yaoundé/Abem. Naga/Ekop Naga. Abale/Essia. Bomanga/Ekop léké. Etimoe. **Sapelli**. Zingana/Amuk. Kotibé. Tchitola. Movingui. Tiama/Ebeka. Lati/Edjil. **Acajou blanc** |
| Mauvaise | Abura/Bahia. Ako/Aloa. Akossika. Diana Z. Ekouné. **Fromager/seba**. Koto. Andoung brun. Emien. Kondroti. Bodioa. Kekele. Ayous/Obéché. Ozigo. Igaganga/Assa. Mingoung. **Aiélé/Abel**. **Fraké/Limba**. | Dibétou/Bibolo. Longhi/Abam. Nieuk/Eyek. **Fraké/Limba**. Gombé. Okoume. **Eyong**. Avodire. **Aningré A**. Faro mezili. Abura/Bahia. Ako/Aloa. Akossika. Diana Z. Ekouné. **Fromager/seba**. **Ilomba**. Koto. **Onzabili K /Angongui**. Andoung brun. Emien. Kondroti. Bodioa. Kekele. **Ayous/Obéché**. Ozigo. Igaganga/Assa. Mingoung. **Aiélé/Abel** |

Note : Les essences en gras et soulignées sont celles qui sont actuellement utilisées pour la fabrication des CP.

## 2.2.10 Utilisation non ligneuse des essences de bois

La préférence des essences de bois est renseignée par la catégorisation de leur niveau de priorité en ce qui concerne l'utilisation alternative de la ressource ligneuse. Cette utilisation concerne les produits forestiers non ligneux (PFNL). Un PFNL prioritaire désigne (Clark et al, 2004) :

- un produit ayant une valeur commerciale et économique élevée, ou qui est important dans le cadre de l'autoconsommation (ayant une valeur pour le bien-être des populations) ;
- une essence ayant des usages multiples, y compris conflictuels ;
- une essence dont les nombreuses parties de l'arbre sont utilisées.

A partir de la classification des PFNL prioritaires proposée par FORENET (2010), cité par Ingram *et al*. (2012), les essences ont été regroupées en trois niveaux de priorité (tableau 2.15) :

- Niveau 1 : il concerne les essences de bois catégorisées comme « PFNL prioritaire » à l'échelle du BC. Ces espèces sont sujettes à de nombreux conflits d'utilisation à l'instar du moabi (*baillonella toxisperma*), de l'emien (*alstonia boonei)* et du sapelli (*entandrophragma cylindricum*);
- Niveau 2 : la priorité des espèces forestières est locale ;
- Niveau 3 : la priorité des essences de bois est mineure ou quasi – négligeable.

Les différentes structures de préférence que nous venons de présenter mettent bien en évidence le caractère conflictuel de certains critères. Prenons l'exemple de l'ayous. Cette essence est créditée d'une bonne régénération naturelle, d'une faible résistance mécanique et une durabilité naturelle insuffisante alors que son potentiel exploitable est très élevé.

*Tableau 2.15 : Classification des 82 essences présélectionnées selon le critère d'utilisation non ligneuse (CIRAD 2011)*

| Niveau de priorité | Essences de bois |
|---|---|
| Niveau 1 | Alep. Angueuk. Bubinga Rouge/oveng ossé. Izombe. Wengé. **Sapelli**. Tiama/Ebeka. Lati / Edjil. **Fraké / Limba**. Abura/Bahia. Padouk rouge. Moabi. **Ayous/Obéché**. **Aiélé/Abel** |
| Niveau 2 | Afok ahié/Coula. Bété / Mansonia. Eben. Makoré/Douka. Mukulungu. Niové. Okan/Adoum. Pao rosa. Tali. Assamela/Afromosia. **Azobé/Bongossi**. Kanda. Landa. Limbali. **Lotofa/Nkanang**. Sipo. Framiré. Ebiara yaoundé/Abem. Movingui. **Acajou blanc**. Dibétou/Bibolo. Longhi/Abam. Nieuk/Eyek. **Okoume**. Faro mezili. Ako/Aloa. Andoung brun. Bodioa. **Fromager/seba**. **Ilomba**. Koto. **Onzabili K/Angongui** |
| Niveau 3 | Bilinga. Difou. Doussié blanc/Pachyloba. Eveuss/Ngon. Iatandza/Evouvouss. **Iroko**. Oboto/Abotzok. Osanga. Bossé foncé. **Kossipo/Kosipo**. **Tola**. Dabéma / Atui. Ekaba. Mambodé/Amouk. Ovoga/Angalé. Bongo H/Olon. Abale/Essia. Awoura/Ekop beli. Bomanga/Ekop léké. Etimoe. Naga/Ekop Naga. Zingana/Amuk. Kotibé. Tchitola. Gombé. **Eyong**. Avodire. **Aningré A**. Akossika. Diana Z. Ekouné. Emien. Kekele. Kondroti. Igaganga/Assa Mingoung. Ozigo |

Note : Les essences en gras et soulignées sont celles qui sont actuellement utilisées pour la fabrication des CP.

## 2.3 Méthodologie

### 2.3.1 Aide à la décision multicritère et gestion forestière dans les pays en développement : étude bibliographique

Des études critiques et très détaillées concernant l'utilisation des méthodes d'Aide à la décision multicritère (ADMC) dans la résolution des problèmes liés à la gestion durable des forêts au cours des 30 dernières années sont disponibles dans la littérature (Mendoza et Martins, 2006 ; Diaz-Balteiro et Romero, 2008 ; Ananda et Herath, 2009 ; Oum 2014). Parmi les méthodes d'ADMC les plus utilisées dans le traitement des problématiques, on distingue l'Analytical Hierarchy Process (AHP) (Saaty, 1990) et la théorie de l'utilité multi-attribut (ou Multi Attribute Utility Theory, MAUT) (Abdellaoui et Gonzales, 2013). L'AHP est une méthode de résolution des

problèmes complexes où le jugement et l'expérience de l'utilisateur y sont intégrés, tout en accélérant le processus de décision. C'est l'une des méthodes les plus répandues de l'ADMC parce qu'elle accompagne le décideur dans la formulation de son problème et en particulier parce qu'elle propose une méthode d'évaluation des paramètres d'importance. Elle procède par combinaisons binaires de chaque niveau de la hiérarchie par rapport aux éléments du niveau supérieur.

La MAUT est inspirée des travaux sur l'utilité de Von Neumann et Morgenstern (1944). Son principe est le suivant : le décideur est supposé associer une utilité à chacune des actions potentielles (choix possibles d'essences de bois) en cause, en considérant séparément chacun des critères (attributs) et en observant quelle utilité dégage chaque critère pour l'action considérée. L'approche ELECTRE permet de construire des préférences plus simplement que MAUT en se basant tout comme AHP sur un système de pondération. ELECTRE permet aussi de dépasser les éventuels défauts exposés précédemment, en intégrant au moyen des pseudo-critères des notions d'indifférence, de préférence et de véto. Le seuil d'indifférence permet de définir le point à partir duquel deux alternatives sont considérées comme équivalentes. Le seuil de préférence fixera le point à partir duquel on préfère une alternative par rapport à l'autre. Enfin, le seuil de véto fixera l'écart maximal entre deux alternatives sur un critère donné. Il va ainsi venir contrecarrer les potentiels effets compensatoires évoqués tantôt en disqualifiant les actions dont les performances sont trop mauvaises sur un ou plusieurs critères. Pour ces raisons, ELECTRE apparaît comme une approche particulièrement adaptée à notre problématique de décision.

### 2.3.2 Méthodes de type Electre

ELECTRE désigne une famille de méthodes mathématiques d'analyse multicritère et d'algorithmes, permettant de résoudre des problèmes d'ADMC. Elles ont déjà été utilisées avec succès dans le domaine du développement durable (Macary et al., 2010; Merad et al., 2013). Elles présentent également l'avantage de bien s'adapter aux situations dans lesquelles l'aide à la décision prend en compte des points de vue conflictuels. Les méthodes ELECTRE permettent de répondre aux problématiques de tri et de rangement, par l'intermédiaire d'une procédure d'affectation et de classement respectivement (Oum, 2014). Cette procédure opère en deux grandes étapes :

- la comparaison des actions à trier ou à classer par paire, de manière à établir une préférence ordonnée des actions au sein de chaque critère ;
- l'agrégation des préférences sur l'ensemble des critères.

Deux méthodes ont été retenues dans ce travail : ELECTRE III et ELECTRE TRI-B. (Annexe 2.3)

L'objet de la première est de construire une hiérarchisation ordinale des essences de bois. La seconde permet de mettre en exergue une hiérarchisation catégorielle des essences. Avant de décrire ces deux méthodes, nous présentons d'abord les hypothèses retenues.

#### 2.3.2.1 Hypothèses

**Hypothèse 1 :** la fiabilité des données utilisées pour construire l'organisation intra-critère des essences de bois est acceptable, et les dites données sont stables sur une période suffisante de 10 ans au moins.

**Hypothèse 2 :** La performance intra-critère est caractérisée par une échelle discrète de notation allant de 0 à 10 (tableau 2.16). La note 0 est exclusive. Elle est attribuée aux essences :

(i) en danger (EN) ou en danger critique d'extinction (CR) ; (ii) à faible durabilité intrinsèque et non imprégnables : (iii) aux essences prioritaires dans le secteur des PFNL. Les traitements de préservation permettent d'améliorer la performance des essences dont la durabilité intrinsèque est moyenne ou faible. Les notes 2, 4, 6, 8 et 10 traduisent des préférences intra critères de qualité respective : « mauvaise », « faible », « passable », « assez bon » et « bon ».

**Hypothèse 3** : Seuils d'indifférence, de préférence et de véto

Au sein d'un critère donné, deux essences de bois a et b seront dites indifférentes si leurs notes sont strictement égales. Dans ce cas, ces essences sont dites équivalentes et leur seuil d'indifférence vaut 0.

Compte tenu de l'échelle de notation qui est discrète et avec peu d'échelons, une différence de notes de 1 entraîne déjà une préférence au sein d'un critère. Le seuil de préférence désigne la différence la plus petite (en valeur absolue) entre deux notes au sein d'un critère, à partir de laquelle la préférence d'une action sur une autre au sein d'un critère peut être établie. Au sein du critère de statut de conservation, les catégories NC et LC constituent un exemple de seuil de préférence.

Le seuil de véto est la valeur à partir de laquelle la différence des performances d'une essence (a) et d'une essence (b) est considérée comme trop grande pour accepter un surclassement de (b) par (a). Il a été fixé à 6.

*Tableau 2.16 : Quantification de la performance intra critère des essences de bois.*

| Critères | Classification | Performance |
|---|---|---|
| Statut de conservation | NC | 10 |
| | LC | 8 |
| | NT | 6 |
| | VU | 2 |
| | EN et CR | 0 |
| Potentiel exploitable | Très élevée | 10 |
| | Elevée | 8 |
| | Moyenne | 6 |
| | Faible | 4 |
| | Très faible | 2 |
| Potentiel de régénération naturelle post-abattage | ≥ 100 | 10 |
| | [75, 100[ | 6 |
| | [50, 75[ | 2 |
| | ≤ 50 | 0 |
| Aptitude au collage traditionnel | Bonne | 10 |
| | Difficile | 6 |
| | Mauvaise | 2 |
| Durabilité naturelle ou conférée :<br>- Champignons<br>- Insectes<br>- Termites | Haute | 10 |
| | Moyenne : essences imprégnables | 9 |
| | Moyenne : essences non impregnable | 8 |
| | Faible essences impregnable | 7 |
| | Faible : essences peu imprégnables | 6 |
| | Faible : essences non imprégnables | 2 |
| Difficulté de déroulage des billons | Bonne | 10 |
| | Moyenne | 6 |
| | Mauvaise | 2 |
| Potentiel de régénération naturelle post-abattage | ≥ 100 | 10 |
| | [75 ; 100[ | 6 |
| | [50 ; 75[ | 4 |
| Direction des fibres | Bonne | 10 |
| | Moyenne | 6 |
| | Mauvais | 4 |
| Rétractabilité | < 4 % | 10 |
| | [4 ; 5,5[ | 6 |
| | > 5,5 | 4 |
| Utilisation non ligneuse | Niveau 1 | 2 |
| | Niveau 2 | 6 |
| | Niveau 3 | 10 |

### 2.3.2.2 Pondération inter-critère et stratégies envisagées d'aide au choix des essences

La pondération d'un critère représente le niveau d'importance qui lui est accordé, dans une perspective de gestion durable du Bassin du Congo. Les poids utilisés sont subjectifs et traduisent l'ensemble des points de vue des acteurs considérés. L'échelle de pondération choisie est discrète et va de 1 à 5. Une stratégie d'aide au choix est définie par la combinaison d'un jeu de pondération inter critère et la performance intra-critère des essences.

Le choix des essences est donc directement influencé par la stratégie considérée. Cinq stratégies (A, B, C, D et E) ont été envisagées.

Pour la classe d'usage 3 (tableau 2.17), la stratégie A accorde une importance équitable aux différents critères dont le poids est fixé à 3. La stratégie B, C, D et E ont en commun une priorisation des critères relatifs au statut de conservation, au potentiel exploitable et aux différentes durabilités naturelles (poids de 5), suivie de l'aptitude au collage et de l'utilisation non ligneuse (poids de 4). Dans la stratégie B, l'importance du module d'élasticité et des directions des fibres du bois est minimisée (poids de 2) et le retrait est minimisé (poids 1). Le critère de régénération naturelle des espèces est minimisé dans la stratégie C (poids 1). Les stratégies D et E se différencient par les poids des critères relatifs au retrait radial (poids de 2 pour D et 1 pour E) et de déroulabilité.

*Tableau 2.17 : Stratégies de choix des essences pour la classe d'usage 3*

| **Critères** | **Stratégie A** | **Stratégie B** | **Stratégie C** | **Stratégie D** | **Stratégie E** |
|---|---|---|---|---|---|
| Statut de conservation | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Potentiel exploitable | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Potentiel de régénération post-récolte | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| Déroulabilité | 3 | 5 | 4 | 4 | 2 |
| Aptitude au collage | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Direction des fibres | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| Retrait radial | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 |
| Module d'élasticité | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| Durabilité naturelle ou conférée face aux champignons | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Durabilité naturelle ou conférée face aux Insectes | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Durabilité naturelle ou conférée face aux Termites | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Utilisation non ligneuse des essences de bois | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 |

En ce qui concerne la classe d'usage 2 (tableau 2.18), les différentes stratégies accordent les mêmes valeurs de poids aux critères que dans le cas de classe d'usage 3, à l'exception du critère de durabilité naturelle. Ces valeurs sont minimisées dans les stratégies D et E ( poids de valeur 2).

*Tableau 2.18 : Stratégies de choix des essences pour la classe d'usage 2*

| **Critères** | **Stratégie A** | **Stratégie B** | **Stratégie C** | **Stratégie D** | **Stratégie E** |
|---|---|---|---|---|---|
| Statut de conservation | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Potentiel exploitable | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Potentiel de régénération post-récolte | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| Déroulabilité | 3 | 5 | 4 | 4 | 2 |
| Aptitude au collage | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Direction des fibres | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| Retrait radial | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 |
| Module d'élasticité | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| Durabilité naturelle ou conférée face aux champignons | 3 | 4 | 4 | 2 | 2 |
| Durabilité naturelle ou conférée face aux Insectes | 3 | 4 | 4 | 2 | 2 |
| Durabilité naturelle ou conférée face aux Termites | 3 | 4 | 4 | 2 | 2 |
| Utilisation non ligneuse des essences de bois | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 |

Dans le cas de la classe d'usage 1 (tableau 2.19), les stratégies B et C sont minimisées dans tous les critères de durabilité naturelle (poids 2) et pour les stratégies D et E, on

note une minimisation de poids 1 sauf en ce qui concerne le critère de durabilité vis-à-vis des insectes.

*Tableau 2.19 : Stratégies de choix des essences pour la classe d'usage 1*

| Critères | Stratégie A | Stratégie B | Stratégie C | Stratégie D | Stratégie E |
|---|---|---|---|---|---|
| Statut de conservation | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Potentiel exploitable | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Potentiel de régénération post-récolte | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| Déroulabilité | 3 | 5 | 4 | 4 | 2 |
| Aptitude au collage | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Direction des fibres | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| Retrait radial | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 |
| Module d'élasticité | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| Durabilité naturelle ou conférée face aux champignons | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Durabilité naturelle ou conférée face aux Insectes | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| Durabilité naturelle ou conférée face aux Termites | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Utilisation non ligneuse des essences de bois | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 |

### 2.3.2.3 Electre III

La méthode ELECTRE III (Roy et Bouyssou, 1993) est une méthode de classement permettant de construire une liste ordonnée d'alternatives (de la plus pertinente pour un décideur à la moins pertinente avec possibilité d'égalité). Ce rangement ordinal est réalisé pour chaque stratégie envisagée. L'algorithme de surclassement est fondé sur le niveau de signification du degré de crédibilité. La procédure de surclassement repose sur le principe de la distillation. Par distillation descendante, on sélectionne les actions partant des meilleures jusqu'aux moins bonnes, à l'inverse de la distillation ascendante. Les deux procédures permettent au décideur de détecter les actions qui présentent une certaine sensibilité du fait de leur incomparabilité, et de les examiner plus en détail (Damaskos et Kalkafakou, 2005).

### 2.3.2.4 Electre Tri-B

L'objectif d'ELECTRE TRI-B est d'affecter les alternatives (les essences de bois) à des catégories prédéfinies (Kangas, 2005). Trois catégories de compromis multicritère sont considérées ici : « Elevée », « Intermédiaire » et « Insuffisante ». La catégorie «Elevée» aide à renseigner les essences les plus intéressantes et susceptibles de satisfaire à une très grande majorité de critères. Les essences de la catégorie «Intermédiaire» sont intéressantes. Elles offrent cependant un compromis moins important que celui de la catégorie « Elevé », mais suffisant pour susciter une assez bonne unanimité des principaux acteurs. La catégorie « Insuffisant » désigne les essences dont l'utilisation pourrait créer des désaccords importants au sein des principaux acteurs. Chaque catégorie est caractérisée par des profils multicritères définissant des limites inférieure et supérieure. Un profil peut être représenté par un vecteur dont les coordonnées correspondent aux

performances intra-critères. La procédure d'affectation opère par comparaison du profil d'une essence de bois donnée aux deux profils limites de chaque catégorie. Il existe deux types d'affection, selon la façon dont sont considérés les cas d'égalité (indifférence ou incomparabilité) : l'affectation optimiste ou pessimiste. Dans l'affectation dite pessimiste, l'essence de bois doit surclasser le profil de la limite inférieure de sa catégorie de destination. Ainsi, en cas d'égalité avec la limite inférieure d'une catégorie, elle sera affectée à une catégorie inférieure. Dans l'affectation optimiste, l'essence est attribuée à la meilleure catégorie pour laquelle sa limite inférieure ne la surclasse pas. Ainsi, en cas d'égalité avec une limite inférieure d'une catégorie, l'essence sera affectée à cette catégorie au minima. La figure 2.2 illustre un exemple d'affectation d'une essence (désignée $\alpha_r$) de bois à une catégorie selon ELECTRE TRI-B. $B_3$ surclasse ($\alpha_r$), d'où la notation $B_3$ (P) $\alpha_r$; ($\alpha_r$) et $B_2$ sont indifférents ($\alpha_r$ (I) $B_2$). ($\alpha_r$) surclasse $B_1$, et a fortiori $B_0$ ($\alpha_r$(P) $B_1$). $B_2$ est le profil inférieur de la catégorie "Bon". ($\alpha_r$) est assignée à la catégorie « Elevé » au sens optimiste et à la catégorie « Intermédiaire » au sens pessimiste.

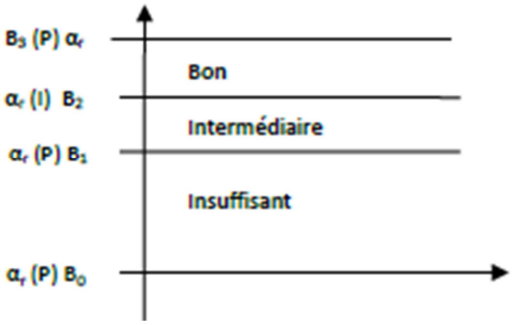



*Figure 2. 2 : Exemple d'affectation d'une essence de bois selon ELECTRE TRI-B*

### 2.3.2.5 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est une étape clé dans le processus d'ADMC. Elle permet de se prononcer sur la robustesse des méthodes utilisées. En effet les méthodes multicritères utilisent plusieurs paramètres (poids, seuils, etc.), qui peuvent avoir un impact majeur sur le résultat. Il y a deux façons d'envisager l'analyse de sensibilité : soit à la fin du processus de décision considéré, afin de s'assurer de la validité du résultat, soit en l'incluant directement dans le processus afin d'obtenir directement un résultat plus robuste. C'est cette seconde approche qui a été retenue par le biais d'une version stochastique d'ELECTRE (Taillandier, 2011). Nous avons doté les paramètres (poids inter-critères, performances intra critères, etc.) d'une structure gaussienne centrée sur les valeurs moyennes ; la plage d'incertitude varie entre 70 % et 120 % des valeurs moyennes. Des simulations de Monte-Carlo sont conduites pour calculer la distribution des résultats (catégorie ou rang). 4 000 itérations ont été effectuées pour chaque stratégie et chaque méthode ELECTRE et pour chaque classe d'usage.

## 2.4 Résultats

### 2.4.1 Hiérarchisation ordinale des essences de bois

La hiérarchisation ordinale est le classement des essences, de la meilleure à la moins bonne (ELECTRE III), pour chaque stratégie de choix envisagée. Les résultats sont présentés suivant les classes d'usage 1, 2 et 3.

#### 2.4.1.1 Classement des essences de bois destinées à un emploi en classe 1

Le tableau 2.20 ressort la hiérarchisation par ordre d'importance des essences de bois pour usage en classe 1 (usage en milieu intérieur). Il y ressort que pour toutes les stratégies considérées, on retrouve parmi les 31 premières essences les suivantes : *Ilomba, Fromager, Aningre A, Limbali, Ayous , Niove, Lotofa, Bete , Dabema, Onzabili K, Longhi, Diana Z, Landa, Gombe, Kanda, Ebiara yde, Awoura, Bomanga, Difou, Bongo H, Mambode, Oboto, Etimoe, Eveuss, Sapelli, Tali, Eyong, Ekaba, Movingui, Frake, Angueuk. On peut constater que les essences les* plus abondantes en forêt telles que le Dabéma, le Niové, le Bété et le Lotofa y sont bien présentes. De plus, elles ne sont pas menacées d'épuisement et présentent une bonne tenue au collage. Leur exploitation ne constitue pas un facteur avéré de conflits sociaux. Nous pouvons donc dire que la méthode ELECTRE III fait émerger un noyau d'espèces ligneuses qui surclassent clairement toutes les autres. Ceci constitue à notre avis un résultat intéressant qui doit rendre possible l'obtention d'un consensus entre les différents acteurs impliqués dans le développement des CP.

*Tableau 2.20 : Hiérarchisation ordinale des essences de bois pour usage en classe 1*

| Rang | Stratégie A | Stratégie B | Stratégie C | Stratégie D | Stratégie E |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Ilomba | Ilomba | Ilomba | Ilomba | Ilomba |
| 2 | Fromager | Aningre A | Fromager | Fromager | Aningre A |
| 3 | Aningre A | Fromager | Aningre A | Aningre A | Fromager |
| 4 | Limbali | Ayous | Niove | Bete | Niove |
| 5 | Ayous | Niove | Lotofa | Ayous | Ayous |
| 6 | Niove | Limbali | Limbali | Niove | Bete |
| 7 | Lotofa | Bete | Bete | Limbali | Lotofa |
| 8 | Bete | Lotofa | Landa | Lotofa | Limbali |
| 9 | Dabema | Landa | Longhi | Longhi | Dabema |
| 10 | Onzabili K | Dabema | Diana Z | Diana Z | Onzabili K |
| 11 | Longhi | Onzabili K | Dabema | Dabema | Longhi |
| 12 | Diana Z | Longhi | Onzabili K | Onzabili K | Diana Z |
| 13 | Landa | Diana Z | Bomanga | Landa | Gombe |
| 14 | Gombe | Kanda | Gombe | Gombe | Landa |
| 15 | Kanda | Ebiara yde | Kanda | Ebiara yde | Awoura |
| 16 | Ebiara yde | Awoura | Ebiara yde | Kanda | Bomanga |
| 17 | Awoura | Bomanga | Ayous | Bomanga | Kanda |
| 18 | Bomanga | Gombe | Awoura | Awoura | Ebiara yde |
| 19 | Difou | Oboto | Bongo H | Difou | Bongo H |
| 20 | Bongo H | Mambode | Difou | Bongo H | Oboto |
| 21 | Mambode | Difou | Oboto | Mambode | Difou |

| Rang | Stratégie A | Stratégie B | Stratégie C | Stratégie D | Stratégie E |
|---|---|---|---|---|---|
| 22 | Oboto | Bongo H | Mambode | Oboto | Mambode |
| 23 | Etimoe | Eveuss | Etimoe | Etimoe | Etimoe |
| 24 | Eveuss | Etimoe | Eveuss | Eveuss | Eveuss |
| 25 | Sapelli | Eyong | Eyong | Tali | Sapelli |
| 26 | Tali | Sapelli | Sapelli | Sapelli | Tali |
| 27 | Eyong | Tali | Tali | Ekaba | Eyong |
| 28 | Ekaba | Ekaba | Angueuk | Eyong | Ekaba |
| 29 | Movingui | Movingui | Ekaba | Movingui | Angueuk |
| 30 | Frake | Frake | Movingui | Frake | Frake |
| 31 | Angueuk | Angueuk | Frake | Angueuk | Movingui |
| 32 | Kotibe | Tiama | Emien | Kotibe | Tiama |
| 33 | Tiama | Abura | Kotibe | Tiama | Pao rosa |
| 34 | Emien | Kotibe | Tiama | Emien | Kotibe |
| 35 | Pao rosa | Emien | Pao rosa | Ako | Emien |
| 36 | Abura | Pao rosa | Abura | Pao rosa | Abura |
| 37 | Okan | Akossika | Okan | Akossika | Okan |
| 38 | Ako | Okan | Ako | Abura | Ako |
| 39 | Akossika | Ako | Akossika | Okan | Akossika |
| 40 | Iatanza | Doussie blanc | Iatanza | Doussie blanc | Naga |
| 41 | Naga | Ekoune | Naga | Iatanza | Doussie blanc |
| 42 | Doussie blanc | Iatanza | Doussie blanc | Naga | Assamela |
| 43 | Ekoune | Naga | Ekoune | Ekoune | Iatanza |
| 44 | Assamela | Assamela | Bosse fonce | Assamela | Bosse fonce |
| 45 | Bosse fonce | Bosse fonce | Assamela | Bosse fonce | Azobe |
| 46 | Azobe | Azobe | Azobe | Azobe | Ekoune |
| 47 | Mukulungu | Alep | Mukulungu | Mukulungu | Mukulungu |
| 48 | Alep | Ovoga | Alep | Ovoga | Ovoga |
| 49 | Ovoga | Mukulungu | Ovoga | Alep | Alep |
| 50 | Iroko | Padouk rouge | Izombe | Iroko | Bubinga E |
| 51 | Izombe | Iroko | Eben | Izombe | Iroko |
| 52 | Bubinga E | Izombe | Iroko | Bubinga E | Izombe |
| 53 | Padouk rouge | Bubinga E | Bubinga E | Padouk rouge | Dibetou |
| 54 | Eben | Makore | Padouk rouge | Eben | Tola |
| 55 | Dibetou | Eben | Faro mezili | Dibetou | Padouk rouge |
| 56 | Tola | Dibetou | Dibetou | Tola | Eben |
| 57 | Makore | Tola | Tola | Makore | Framire |
| 58 | Framire | Nieuk | Makore | Framire | Koto |
| 59 | Koto | Framire | Framire | Faro mezili | Makore |
| 60 | Nieuk | Koto | Koto | Nieuk | Nieuk |
| 61 | Faro mezili | Faro mezili | Nieuk | Koto | Faro mezili |
| 62 | Bilinga | Bilinga | Lati | Kossipo | Bilinga |
| 63 | Afok ahie | Afok ahie | Tchitola | Bilinga | Afok ahie |
| 64 | Lati | Lati | Bilinga | Tchitola | Lati |
| 65 | Kossipo | Tchitola | Afok ahie | Lati | Kossipo |
| 66 | Tchitola | Kossipo | Kossipo | Afok ahie | Tchitola |
| 67 | Acajou blanc | Sipo | Acajou blanc | Osanga | Abale |
| 68 | Andoung brun | Osanga | Sipo | Andoung brun | Osanga |
| 69 | Sipo | Acajou blanc | Andoung brun | Acajou blanc | Ozigo |
| 70 | Aiélé / Abel | Ozigo | Ozigo | Aiélé / Abel | Andoung brun |
| 71 | Ozigo | Andoung brun | Aiélé / Abel | Ozigo | Sipo |
| 72 | Osanga | Abale | Moabi | Sipo | Acajou blanc |
| 73 | Abale | Aiélé / Abel | Osanga | Abale | Aiélé / Abel |
| 74 | Moabi | Okoume | Igaganga | Moabi | Okoume |
| 75 | Igaganga | Moabi | Abale | Okoume | Zingana |
| 76 | kekele | Igaganga | kekele | kekele | Moabi |
| 77 | Okoume | kekele | Okoume | Igaganga | Igaganga |
| 78 | Bodioa | Zingana | Bodioa | Bodioa | kekele |
| 79 | Avodire | Avodire | Zingana | Avodire | Avodire |

| Rang | Stratégie A | Stratégie B | Stratégie C | Stratégie D | Stratégie E |
|---|---|---|---|---|---|
| 80 | Zingana | Bodioa | Avodire | Zingana | Bodioa |
| 81 | Wenge | Wenge | Wenge | Wenge | Wenge |
| 82 | Kondroti | Kondroti | Kondroti | Kondroti | Kondroti |

### 2.4.1.2 Classement des essences de bois destinées à un emploi en classe 2

Pour ce qui est des essences pour usage en classe 2, le panel d'espèces récurrentes dans les meilleures positions à toutes les catégories est constitué de 21 individus, à savoir *: Bete, Niove, Kanda, Limbali, Dabema, Lotofa, Longhi, Oboto, Ebiara yde, Angueuk, Awoura, Bomanga, Difou, Bongo H, Mambode, Landa, Etimoe, Eveuss, Diana Z, Onzabili K, Sapellii.*

Les trois premiers individus les plus récurrents en classe 1 à savoir : *Fromager, Aningre,* ont considérablement régressé dans leur classement à cause de leur faible durabilité vis-à-vis des termites et insectes.

*Tableau 2.21 : Hiérarchisation ordinale des essences de bois pour usage en classe 2*

| Rang | Stratégie A | Stratégie B | Stratégie C | Stratégie D | Stratégie E |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Bete | Niove | Bete | Bete | Bete |
| 2 | Niove | Bete | Niove | Niove | Niove |
| 3 | Kanda | Kanda | Oboto | Kanda | Kanda |
| 4 | Limbali | Limbali | Limbali | Limbali | Limbali |
| 5 | Dabema | Oboto | Kanda | Lotofa | Dabema |
| 6 | Lotofa | Dabema | Dabema | Longhi | Lotofa |
| 7 | Longhi | Ebiara yde | Ebiara yde | Ebiara yde | Longhi |
| 8 | Oboto | Longhi | Longhi | Dabema | Angueuk |
| 9 | Ebiara yde | Angueuk | Lotofa | Oboto | Oboto |
| 10 | Angueuk | Lotofa | Difou | Angueuk | Ebiara yde |
| 11 | Awoura | Difou | Angueuk | Difou | Awoura |
| 12 | Bomanga | Awoura | Awoura | Bongo H | Bomanga |
| 13 | Difou | Bomanga | Bomanga | Bomanga | Difou |
| 14 | Bongo H | Mambode | Mambode | Awoura | Bongo H |
| 15 | Mambode | Landa | Bongo H | Landa | Mambode |
| 16 | Landa | Bongo H | Landa | Mambode | Landa |
| 17 | Etimoe | Etimoe | Eveuss | Etimoe | Etimoe |
| 18 | Eveuss | Sapelli | Onzabili K | Onzabili K | Eveuss |
| 19 | Diana Z | Onzabili K | Sapelli | Sapelli | Diana Z |
| 20 | Onzabili K | Diana Z | Etimoe | Eveuss | Onzabili K |
| 21 | Sapelli | Eveuss | Diana Z | Diana Z | Sapelli |
| 22 | Tali | Nieuk | Ekaba | Tali | Tali |
| 23 | Nieuk | Ekaba | Nieuk | Nieuk | Nieuk |
| 24 | Eyong | Tali | Tali | Ekaba | Movingui |
| 25 | Ekaba | Movingui | Movingui | Movingui | Ilomba |
| 26 | Movingui | Eyong | Eyong | Eyong | Eyong |
| 27 | Ayous | Aningre A | Aningre A | Aningre A | Ayous |
| 28 | Ilomba | Ayous | Ayous | Ayous | Ekaba |
| 29 | Aningre A | Frake | Frake | Ilomba | Aningre A |
| 30 | Fromager | Ilomba | Ilomba | Kotibe | Fromager |
| 31 | Frake | Gombe | Kotibe | Frake | Frake |
| 32 | Gombe | Kotibe | Tiama | Gombe | Gombe |
| 33 | Kotibe | Tiama | Ako | Fromager | Emien |
| 34 | Tiama | Ako | Gombe | Emien | Tiama |
| 35 | Emien | Emien | Fromager | Okan | Kotibe |
| 36 | Pao rosa | Fromager | Emien | Ako | Pao rosa |

| Rang | Stratégie A | Stratégie B | Stratégie C | Stratégie D | Stratégie E |
|---|---|---|---|---|---|
| 37 | Abura | Okan | Okan | Tiama | Abura |
| 38 | Okan | Pao rosa | Pao rosa | Abura | Okan |
| 39 | Ako | Abura | Abura | Pao rosa | Ako |
| 40 | Akossika | Ekoune | Alep | Akossika | Akossika |
| 41 | Iatanza | Akossika | Doussie blanc | Iatanza | Doussie blanc |
| 42 | Naga | Iatanza | Assamela | Assamela | Assamela |
| 43 | Doussie blanc | Alep | Ekoune | Ekoune | Iatanza |
| 44 | Ekoune | Doussie blanc | Akossika | Bosse fonce | Ekoune |
| 45 | Assamela | Assamela | Iatanza | Doussie blanc | Naga |
| 46 | Bosse fonce | Bosse fonce | Bosse fonce | Naga | Bosse fonce |
| 47 | Azobe | Naga | Naga | Azobe | Azobe |
| 48 | Mukulungu | Ovoga | Ovoga | Mukulungu | Mukulungu |
| 49 | Alep | Azobe | Azobe | Alep | Alep |
| 50 | Ovoga | Mukulungu | Bubinga E | Ovoga | Ovoga |
| 51 | Iroko | Izombe | Izombe | Izombe | Iroko |
| 52 | Izombe | Bubinga E | Mukulungu | Iroko | Izombe |
| 53 | Bubinga E | Iroko | Iroko | Makore | Bubinga E |
| 54 | Padouk rouge | Framire | Framire | Bubinga E | Padouk rouge |
| 55 | Eben | Koto | Koto | Dibetou | Eben |
| 56 | Dibetou | Padouk rouge | Padouk rouge | Tola | Dibetou |
| 57 | Tola | Faro mezili | Faro mezili | Padouk rouge | Tola |
| 58 | Makore | Dibetou | Dibetou | Eben | Makore |
| 59 | Framire | Tola | Tola | Makore | Framire |
| 60 | Koto | Makore | Makore | Framire | Koto |
| 61 | Faro mezili | Eben | Eben | Faro mezili | Lati |
| 62 | Bilinga | Lati | Lati | Lati | Faro mezili |
| 63 | Afok ahie | Bilinga | Bilinga | Kossipo | Bilinga |
| 64 | Lati | Kossipo | Kossipo | Bilinga | Sapelli |
| 65 | Kossipo | Afok ahie | Tchitola | Afok ahie | Afok ahie |
| 66 | Tchitola | Acajou blanc | Andoung brun | Andoung brun | Tchitola |
| 67 | Acajou blanc | Tchitola | Afok ahie | Acajou blanc | Acajou blanc |
| 68 | Andoung brun | Andoung brun | Acajou blanc | Tchitola | Andoung brun |
| 69 | Sipo | Sipo | Sipo | Aiélé / Abel | Sipo |
| 70 | Aiélé / Abel | Ozigo | Ozigo | Sipo | Aiélé / Abel |
| 71 | Ozigo | Osanga | Osanga | Ozigo | Ozigo |
| 72 | Osanga | Aiélé / Abel | Okoume | Osanga | Osanga |
| 73 | Abale | Okoume | Aiélé / Abel | Moabi | Abale |
| 74 | Moabi | Abale | Abale | Igaganga | Moabi |
| 75 | Igaganga | Moabi | Moabi | Abale | Okoume |
| 76 | kekele | Igaganga | Igaganga | kekele | kekele |
| 77 | Okoume | kekele | kekele | Okoume | Igaganga |
| 78 | Bodioa | Avodire | Zingana | Bodioa | Bodioa |
| 79 | Avodire | Zingana | Avodire | Zingana | Avodire |
| 80 | Zingana | Bodioa | Bodioa | Avodire | Zingana |
| 81 | Wenge | Wenge | Wenge | Wenge | Wenge |
| 82 | Kondroti | Kondroti | Kondroti | Kondroti | Kondroti |

### 2.4.1.3 Classement des essences de bois destinées à un emploi en classe 3

Les résultats obtenus au tableau 2.22 relatifs aux essences destinées à une utilisation en classe 3, sont très proches de ceux de la classe 2. Il y ressort que pour toutes les stratégies considérées, on retrouve parmi les 16 premières essences les suivantes: *Bete, Kanda, Limbali, Lotofa, Niove, Oboto, Angueuk, Ebiara yde, Awoura, Bomanga, Difou, Bongo H, Mambode,*

*Landa, Sapelli, Dabema*. Toutefois, certaines espèces comme le longhi et l'Ilomba sont sous classées à cause de leur très faible résistance aux champignons.

*Tableau 2.22 : Hiérarchisation ordinale des essences de bois pour usage en classe 3*

| **Rang** | **Stratégie A** | **Stratégie B** | **Stratégie C** | **Stratégie D** | **Stratégie E** |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Bete | Bete | Bete | Bete | Bete |
| 2 | Kanda | Kanda | Niove | Kanda | Niove |
| 3 | Limbali | Limbali | Oboto | Niove | Limbali |
| 4 | Lotofa | Niove | Kanda | Limbali | Kanda |
| 5 | Niove | Ebiara yde | Limbali | Lotofa | Ebiara yde |
| 6 | Oboto | Oboto | Lotofa | Oboto | Oboto |
| 7 | Angueuk | Lotofa | Angueuk | Angueuk | Lotofa |
| 8 | Ebiara yde | Angueuk | Ebiara yde | Ebiara yde | Angueuk |
| 9 | Awoura | Difou | Difou | Awoura | Difou |
| 10 | Bomanga | Awoura | Bongo H | Bomanga | Awoura |
| 11 | Difou | Bomanga | Bomanga | Difou | Bomanga |
| 12 | Bongo H | Mambode | Awoura | Bongo H | Mambode |
| 13 | Mambode | Bongo H | Landa | Mambode | Bongo H |
| 14 | Landa | Landa | Dabema | Landa | Dabema |
| 15 | Sapelli | Dabema | Mambode | Dabema | Sapelli |
| 16 | Dabema | Sapelli | Sapelli | Sapelli | Landa |
| 17 | Etimoe | Etimoe | Eveuss | Etimoe | Etimoe |
| 18 | Eveuss | Onzabili K | Etimoe | Eveuss | Onzabili K |
| 19 | Diana Z | Diana Z | Onzabili K | Diana Z | Longhi |
| 20 | Onzabili K | Eveuss | Diana Z | Onzabili K | Eveuss |
| 21 | Tali | Longhi | Tali | Tali | Diana Z |
| 22 | Longhi | Ekaba | Longhi | Longhi | Ekaba |
| 23 | Eyong | Tali | Ekaba | Movingui | Tali |
| 24 | Ekaba | Movingui | Movingui | Ilomba | Movingui |
| 25 | Movingui | Frake | Eyong | Eyong | Eyong |
| 26 | Ayous | Aningre A | Aningre A | Ayous | Aningre A |
| 27 | Ilomba | Ayous | Ayous | Ekaba | Ayous |
| 28 | Aningre A | Eyong | Ilomba | Aningre A | Frake |
| 29 | Fromager | Ilomba | Kotibe | Fromager | Ilomba |
| 30 | Frake | Fromager | Frake | Frake | Kotibe |
| 31 | Gombe | Gombe | Gombe | Gombe | Tiama |
| 32 | Kotibe | Kotibe | Fromager | Emien | Fromager |
| 33 | Tiama | Tiama | Emien | Tiama | Gombe |
| 34 | Emien | Ako | Okan | Kotibe | Ako |
| 35 | Pao rosa | Emien | Ako | Pao rosa | Emien |
| 36 | Abura | Okan | Tiama | Abura | Abura |
| 37 | Okan | Pao rosa | Abura | Okan | Okan |
| 38 | Ako | Abura | Pao rosa | Ako | Pao rosa |
| 39 | Akossika | Ekoune | Akossika | Akossika | Alep |
| 40 | Iatanza | Akossika | Iatanza | Doussie blanc | Doussie blanc |
| 41 | Naga | Iatanza | Assamela | Assamela | Assamela |
| 42 | Doussie blanc | Alep | Ekoune | Iatanza | Ekoune |
| 43 | Ekoune | Doussie blanc | Bosse fonce | Ekoune | Akossika |
| 44 | Assamela | Assamela | Doussie blanc | Naga | Iatanza |
| 45 | Bosse fonce | Bosse fonce | Naga | Bosse fonce | Bosse fonce |
| 46 | Azobe | Naga | Azobe | Azobe | Naga |
| 47 | Mukulungu | Ovoga | Mukulungu | Mukulungu | Ovoga |
| 48 | Alep | Azobe | Alep | Alep | Azobe |
| 49 | Ovoga | Mukulungu | Ovoga | Ovoga | Bubinga E |
| 50 | Iroko | Izombe | Izombe | Iroko | Izombe |
| 51 | Izombe | Bubinga E | Iroko | Izombe | Mukulungu |
| 52 | Bubinga E | Iroko | Koto | Bubinga E | Iroko |

| Rang | Stratégie A | Stratégie B | Stratégie C | Stratégie D | Stratégie E |
|---|---|---|---|---|---|
| 53 | Padouk rouge | Framire | Bubinga E | Padouk rouge | Framire |
| 54 | Eben | Koto | Dibetou | Eben | Koto |
| 55 | Dibetou | Padouk rouge | Tola | Dibetou | Padouk rouge |
| 56 | Tola | Faro mezili | Padouk rouge | Tola | Faro mezili |
| 57 | Makore | Dibetou | Eben | Makore | Dibetou |
| 58 | Framire | Tola | Makore | Framire | Tola |
| 59 | Koto | Makore | Framire | Koto | Makore |
| 60 | Nieuk | Eben | Nieuk | Lati | Eben |
| 61 | Faro mezili | Nieuk | Faro mezili | Faro mezili | Nieuk |
| 62 | Bilinga | Lati | Lati | Bilinga | Lati |
| 63 | Afok ahie | Bilinga | Kossipo | Afok ahie | Bilinga |
| 64 | Lati | Kossipo | Bilinga | Nieuk | Kossipo |
| 65 | Kossipo | Afok ahie | Afok ahie | Kossipo | Tchitola |
| 66 | Tchitola | Acajou blanc | Andoung brun | Tchitola | Andoung brun |
| 67 | Acajou blanc | Tchitola | Acajou blanc | Acajou blanc | Afok ahie |
| 68 | Andoung brun | Andoung brun | Tchitola | Andoung brun | Acajou blanc |
| 69 | Sipo | Sipo | Aiélé / Abel | Sipo | Sipo |
| 70 | Aiélé / Abel | Ozigo | Sipo | Aiélé / Abel | Ozigo |
| 71 | Ozigo | Osanga | Ozigo | Ozigo | Osanga |
| 72 | Osanga | Aiélé / Abel | Osanga | Osanga | Aiélé / Abel |
| 73 | Abale | Okoume | Moabi | Abale | Okoume |
| 74 | Moabi | Abale | Igaganga | Moabi | Abale |
| 75 | Igaganga | Moabi | Abale | Okoume | Zingana |
| 76 | kekele | Igaganga | Zingana | kekele | Moabi |
| 77 | Okoume | Zingana | kekele | Igaganga | Igaganga |
| 78 | Bodioa | kekele | Okoume | Bodioa | kekele |
| 79 | Avodire | Avodire | Bodioa | Avodire | Avodire |
| 80 | Zingana | Bodioa | Avodire | Zingana | Bodioa |
| 81 | Wenge | Wenge | Wenge | Wenge | Wenge |
| 82 | Kondroti | Kondroti | Kondroti | Kondroti | Kondroti |

Dans chaque classe d'usage considérée, les queues de hiérarchisation sont essentiellement occupées par les espèces menacées d'épuisement et peu abondantes en forêt. On peut citer par exemple le Kondroti et le wengé qui occupent les dernières places dans tous les classements, indépendamment des stratégies considérées. On y retrouve également des espèces comme le moabi, l'avodire, le Kekele et l'okoumé.

## 2.4.2 Hiérarchisation catégorielle des essences de bois

La hiérarchisation catégorielle est le classement des essences par niveau d'appréciation, (ELECTRE TRI), pour chaque stratégie de choix envisagée. Les résultats sont présentés suivant les classes d'usage 1, 2 et 3.

### 2.4.2.1 Hiérarchisation catégorielle de la classe 1

Le nombre d'essences de bois appartenant à la catégorie « Elevée » varie très légèrement selon la stratégie considérée (Annexe 2.4). C'est la catégorie dans laquelle les essences satisfont bien à la très grande majorité des critères, ce qui indique une préférence globale très élevée. En prenant l'exemple de l'Ayous pour la classe d'usage 1, sa déroulabilité ne pose pas de difficulté

particulière ; et sa tenue au collage traditionnel est bonne ; son potentiel de régénération est intéressant. De plus, l'Ayous est non menacé et figure parmi les essences les plus rencontrées en forêt.

Les espèces suivantes : Aningre A, Ayous, Bete, Bomanga, Dabema, Diana Z, Ebiara yde, Fromager, Gombe, Ilomba, Kanda, Limbali, Lotofa, Longhi, Mambode, Niove y sont absolument récurrentes indépendamment de la stratégie de choix envisagée dans les classes d'usage 1. Par contre, dans la stratégie A, on constate que deux essences à potentiel très faible et faible figurent dans la catégorie « Elevée », à savoir l'Oboto et l'Awoura (Tableau 2.5).

Les essences de la catégorie « Intermédiaire » varient également très peu. On y dénombre une quinzaine d'individus. Les espèces suivantes apparaissent comme les plus récurrentes : *Angueuk, Awoura, Bongo H, Difou, Ekaba, Etimoe, Eveuss, Eyong, Frake, Kotibe, Landa, Movingui, Oboto, Tali.* La présence d'essences menacées dans l'une des catégories « Elevée » ou « Intermédiaire » contrarie l'objectif de conserver la diversité de la ressource ligneuse.

Pour cette raison la stratégie A ne semble pas appropriée puisqu'elle surclasse l'essence *Kotibe* qui est vulnérable dans la catégorie « Elevée ». La stratégie E se distingue nettement des autres du point de vue de la déroulabilité des bois. Il nous semble donc indiqué de retenir la stratégie E qui met un accent un peu plus marqué sur la déroulabilité des produits que les autres.

La catégorie « Insuffisant » est constituée d'essences menacées pour la plupart, et réputées difficiles à coller ou transformer dans certains cas. C'est l'exemple du wengé.

En définitive, nous proposons de retenir comme résultat dans cette partie le résultat correspondant à la stratégie E. Elle permet de renseigner les 3 catégories de consensus suivantes : « Elevée », « Intermédiaire » et « Faible » de la manière suivante :

« **Elevée » :** Aningre A, Ayous, Bete, Bomanga, Dabema, Diana Z, Ebiara yde, Fromager, Gombe, Ilomba, Kanda, Limbali, Lotofa, Longhi, Mambode, Niove,

**« Intermédiaire » :** Angueuk, Awoura, Bongo H, Ekaba, Etimoe, Eveuss, Eyong, Frake, Landa, Movingui, Oboto, Onzabili K, Tali.

**« Faible » :** Abale, Abura, Acajou blanc, Afok ahie, Aiélé / Abel, Ako, Akossika, Alep, Andoung brun, Assamela, Avodire, Azobe, Bilinga, Bodioa, Bosse fonce, Bubinga E, Dibetou, Difou, Doussie blanc, Eben, Ekoune, Emien, Faro mezili, Framire, Iatanza, Igaganga, Iroko, Izombe, kekele, Kondroti, Kossipo, Koto, Lati, Makore, Moabi, Mukulungu, Naga, Nieuk, Okan, Okoume, Osanga, Ovoga, Ozigo, Padouk rouge, Pao rosa, Sapelli, Sipo, Tchitola, Tiama, Tola, Wenge

Il apparaît d'après ce résultat, des éléments communs avec la hiérarchisation ordinale des essences. Nous analyserons en détail ce point dans le paragraphe 2.5 (Discussion).

### 2.4.2.2 Hiérarchisation catégorielle de la classe 2

Nous faisons pratiquement les mêmes remarques sur les classifications des essences en classe d'usage 2 (Annexe 2.5). Les critères durabilités face aux champignons, insectes et termites sont mis en avant. Les essences telles que l'Aningré A, l'Ayous, Fromager, etc.. de la catégorie élevée en classe d'usage 1 se retrouvent dans la catégorie faible en classe d'usage 2. Ainsi pour la classe d'usage 2, les catégories de compromission suivant la stratégie B sont présentées comme suit :

**« Elevée » :** Bete, Bomanga, Dabema, Ebiara yde, Kanda, Limbali, Lotofa, Mambode

**« Intermédiaire » :** Angueuk, Awoura  Bongo H, Ekaba, Niove, Landa, Longhi, Movingui Oboto

**« Faible » :** Abale, Abura, Acajou blanc, Afok ahie, Aiélé / Abel, Ako, Akossika, Alep, Andoung brun, Aningre A, Assamela, Avodire, Ayous, Azobe, Bilinga, Bodioa, Bosse fonce, Bubinga E, Diana Z, Dibetou, Difou, Doussie blanc, Eben, Ekoune, Emien, Etimoe, Eveuss, Eyong, Faro mezili, Frake, Framire, Fromager, Gombe, Iatanza, Igaganga, Ilomba, Iroko, Izombe, kekele, Kondroti, Kossipo, Kotibe, Koto, Lati, Makore, Moabi, Mukulungu, Naga, Nieuk, Okan, Okoume, Onzabili K, Osanga, Ovoga, Ozigo, Padouk rouge, Pao rosa, Sapelli, Sipo, Tali, Tchitola, Tiama, Tola, Wenge

### 2.4.2.3 Hiérarchisation catégorielle de la classe 3.

Le nombre d'essences de bois appartenant à la catégorie « Elevée » varie  très légèrement selon la stratégie considérée (Annexe 2.6). C'est la catégorie dans laquelle les essences satisfont bien à la très grande majorité des critères, ce qui indique une préférence globale très élevée. En prenant l'exemple du Bété pour la classe d'usage 3, sa déroulabilité ne pose pas de difficulté particulière ; sa durabilité naturelle ou conférée est haute et sa tenue au collage traditionnel est bonne ; son potentiel de régénération est intéressant. De plus, le bété est non menacé et figure parmi les essences les plus rencontrées en forêt. Sa résistance mécanique lui offre une bonne aptitude à panneau de structures.

Le bété, le Kanda et le limbali y sont absolument récurrentes indépendamment de la stratégie de choix envisagée dans les classes d'usage 3.

Lorsqu'on minimise l'importance du critère de la déroulabilité dans la classe d'utilisation 3, il s'ajoute l'essence comme le Difou (stratégie E ). Cette stratégie ne nous semble pas réaliste du

point de vue de la capacité de déroulabilité de certains bois durs par les industriels locaux. Notons également que la stratégie C minimise le critère de régénération de la ressource. Les essences de la catégorie « Intermédiaire » varient très peu. On dénombre 11 à 15 individus au total. Les espèces suivantes apparaissent comme les plus récurrentes : *Angueuk, Bomanga, Bongo H Dabema, Difou, Ebiara yde, Ekaba, Mambode, Movingui, Niové, Oboto, Mambode.* Par contre, dans la stratégie A, on constate que deux essences vulnérables figurent dans la catégorie « Intermédiaire », à savoir le Bilinga et le Doussié (tableau 2.4). La présence d'essences menacées dans l'une des catégories «Elevé » ou « Intermédiaire » contrarie l'objectif de conserver la diversité de la ressource ligneuse. Pour cette raison, la stratégie A ne semble pas appropriée. Les stratégies B et D se distinguent nettement des précédentes du point de vue de la déroulabilité des bois et de la régénération de la ressource. Leurs résultats sont très similaires. Il nous semble donc indiqué de retenir la stratégie B qui met un accent un peu plus marqué sur la déroulabilité des produits que la stratégie D.

La catégorie « Faible » est constituée d'essences menacées pour la plupart, et réputées difficiles à coller ou à transformer dans certains cas. C'est l'exemple du wengé.

En définitive, nous proposons de retenir comme résultat dans cette partie la catégorisation correspondante à la stratégie B. Elle permet de renseigner les 3 qualités de compromis suivantes : «Elevée », « Intermédiaire » et « Faible » de la manière suivante :

**« Elevée » :** Bete, Kanda, Limbali; Lotofa,

**« Intermédiaire » :** Bomanga, Bongo H Dabema, Ebiara yde, Longhi, Mambode, Movingui, Niové, Oboto, Mambode.

**« Faible » :** Abale, Abura, Acajou blanc ; Afok ahie, Aiélé/Abel; Ako, Akossika, Alep, Andoung brun, Aningre A, Angueuk, Assamela, Avodire, Awoura, Ayous, Azobe, Bilinga, Bodioa, Bosse fonce, Bubinga E, Diana Z, Dibetou, Difou, Doussie blanc, Eben, Ekaba, Ekoune, Emien, Etimoe, Eveuss, Eyong, Faro mezili, Frake, Framire, Fromager, Gombe, Iatanza, Igaganga, Ilomba, Iroko, Izombe, kekele, Kondroti, Kossipo, Kotibe, Koto, Lati, Makore, Moabi, Movingui, Mukulungu, Naga, Nieuk, Okan, Okoume, Onzabili K, Osanga, Ovoga, Ozigo, Padouk rouge, Pao rosa, Sapelli, Sipo, Tali, Tchitola, Tiama, Tola, Wenge , Zingana

Il apparaît d'après ce résultat, des éléments communs avec la hiérarchisation ordinale des essences. Nous analyserons en détail ce point dans le paragraphe 2.5 (Discussion).

### 2.4.3 Sensibilité des résultats

Les résultats des méthodes ELECTRE sont tributaires pour une grande part de la pondération des critères. Dans cette partie, nous traitons de la sensibilité des résultats des méthodes ELECTRE III et ELECTRE TRI à la variabilité de la pondération intra-critère des essences.

#### 2.4.3.1 Hiérarchisation catégorielle des essences

D'une manière générale, la sensibilité des résultats de la méthode ELECTRE TRI-B est très faible. Elle n'excède pas 5% du point de vue de l'affectation des essences aux différentes catégories. Certaines essences comme l'angueuk peuvent être entièrement positionnées selon la distillation considérée, dans la catégorie « Elevée » ou « Intermédiaire » avec un taux d'affectation 100%. Dans ce cas, la catégorie définitive est « Intermédiaire ». En revanche, l'affectation des essences comme le Kanda et le bété ne dépend pas de la distillation considérée (tableau 2.23).

D'autres essences se caractérisent par de très légères différences d'affectation selon la distillation considérée. Prenons l'exemple du limbali. En ce qui concerne la distillation pessimiste, cette essence est affectée dans 2,52 % des cas dans la catégorie « Intermédiaire » et dans près de 97,48 % des cas dans la catégorie « Elevée ». Ceci se justifie par le fait que cette essence présente des préférences élevées sur l'ensemble des critères à l'exception du critère de déroulabilité, ce qui n'est pas le cas du Kanda par exemple qui présente une préférence très élevée sur tous les critères. Lorsque le poids correspondant au critère « déroulabilité » va varier de façon aléatoire mais en diminuant, le limbali aura tendance à être assigné dans la catégorie « Intermédiaire ». Toutefois, le pourcentage d'affectation dans cette catégorie va demeurer faible parce le limbali a des poids intra critères globalement élevés sur tous les autres critères.

La faible sensibilité des résultats de la méthode ELECTRE TRI-B est un indicateur de sa robustesse.

*Tableau 2.23 : Exemples d'affectation des essences de bois aux catégories de compromis multicritère ( cas de la stratégie B (ELECTRE TRI-B) pour la classe d'usage 3)*

| Essences de bois | Distillations | Faible (%) | Intermédiaire (%) | Elevé (%) | Catégorie assignée |
|---|---|---|---|---|---|
| Kanda (beilschmiedia spp) | Pessimiste | 0 | 0 | 100 | Elevé |
| | Optimiste | 0 | 0 | 100 | |
| Bete (mansonia) | Pessimiste | 0 | 0 | 100 | Elevé |
| | Optimiste | 0 | 0 | 100 | |
| Limbali (gilbertiodendron dewevrei) | Pessimiste | 0 | 2.52 | 97.48 | Elevé |
| | Optimiste | 0 | 0 | 100 | |
| Angueuk (ongokea gore) | Pessimiste | 0 | 0 | 100 | Intermédiaire |
| | Optimiste | 0 | 100 | 0 | |

### 2.4.3.2 Hiérarchisation ordinale des essences de bois

Le classement des essences de bois, basé sur une approche d'ordonnancement (1er, 2e, 3e, ..) est très sensible à la variabilité de la pondération. En ce qui concerne la stratégie D par exemple (tableau 2.24), le bété (*mansonia altissima*) est 1er dans 29% de cas, 2e dans 25 % de cas, et 3e dans 16 % de cas. La décision d'attribution de l'ordre définitif de classement s'appuie sur un système de scoring (Oum, 2014). Le score d'une essence Ej est défini par :

$$SC(E_j) = \sum_{i=1}^{82} Rang(i).P_i(E_j) \qquad \textit{(eq 2.5)}$$

avec : Rang (i): rang d'ordre i;

- Pi (Ej): probabilité de l'essence Ej d'occuper le rang d'ordre i, exprimée en pourcentage. Les rangs les plus élevés correspondant aux scores les plus faibles. Dans l'exemple du tableau 2.24, le bété, le Kanda et le limbali enregistrent des scores respectifs de 279,2 ; 285,72 et 392.22. Le Bété est donc premier, suivi par le Kanda (deuxième) et le limbali (troisième).

*Tableau 2.24 : Exemple d'attribution du rang des essences de bois selon ELECTRE III, stratégie B pour la classe d'usage 3*

| Rang | Bete (%) | Kanda (%) | Limbali (%) | Lotofa %) | Bomanga (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 29.03 | 24.33 | 9.74 | 0 | 0 |
| 2 | 24.83 | 25.68 | 13.87 | 0 | 0 |
| 3 | 15.65 | 29.01 | 11.87 | 32.26 | 35.22 |
| 4 | 0.03 | 1.68 | 28.46 | 17.76 | 0.25 |
| 5 | 29.9 | 6.25 | 12.25 | 0.85 | 11.43 |
| 6 | 0.4 | 6.32 | 22.63 | 1.94 | 1.53 |
| 7 | 0.02 | 6.73 | 1.18 | 5.64 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 5.02 | 0.57 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 22.44 | 0 |
| 10 | 0.14 | 0 | 0 | 6.45 | 0 |
| Total des rangs inférieurs | 0 | 0 | 0 | 7.64 | 51 |
| Score (Ej) | 279,2 | 285,72 | 392,22 | 613 | 838,55 |
| Rang final | 1er | 2ème | 3ème | 7ème | 11ème |

## 2.5 Discussions

Cette rubrique comprend trois points, à savoir : l'approche de sélection multicritère des espèces à privilégier, l'émergence de nouvelles bases de données pour la fabrication des CP et l'impact potentiel sur l'amélioration des pratiques forestières.

### 2.5.1 Approche de sélection multicritère à privilégier

La mise en œuvre de la méthode ELECTRE III rend possible une organisation de la valorisation d'un seul noyau d'espèces de bois selon la classe d'utilisation considérée. Les individus de ce noyau dominent globalement les meilleures positions de la hiérarchisation ordinale indépendamment de la stratégie considérée, avec quelques différences au niveau des effectifs en présence. Cette hiérarchie est organisée autour de la finesse/précision offerte par le surclassement d'une espèce ligneuse par une autre, sur l'ensemble des critères considérés. Toutefois, ELECTRE III présente l'inconvénient majeur d'une très forte sensibilité des surclassements vis-à-vis des différents paramètres du modèle et des essences de bois. Cela pourrait donc affecter négativement la robustesse des décisions de valorisation dans leur ensemble.

L'affectation des essences à des catégories raisonnablement prédéfinies (ELECTRE TRI-B) conduit à des résultats très stables (la sensibilité est très faible, inférieure à 5%). ELECTRE TRI-B apparaît donc comme étant plus robuste que ELECTRE III. En outre, une essence de bois peut figurer au rang des premières et être en même temps affectée à la catégorie «Intermédiaire». Tel est le cas du Niove pour la classe d'usage 3. Cette situation peut conduire (à terme) à des décisions dont l'impact serait négatif dans un contexte de gestion durable des forêts congolaises.

Les arguments précédents nous suggèrent donc de retenir la méthode ELECTRE TRI-B, comme étant la mieux adaptée à la hiérarchisation des choix d'essences. L'un des avantages majeurs de la méthode ELECTRE TRI-B est de renseigner directement les essences à prioriser dans le processus décisionnel de valorisation au sens du respect des préoccupations des différents acteurs. Le niveau de priorité le plus élevé correspond à la catégorie des « consensus élevés ». On y trouve, indépendamment de la stratégie et de la classe d'usage considérées, des essences comme le bété qui maximisent pratiquement l'ensemble des critères en présence. Le niveau de priorité « Intermédiaire » regroupe les espèces qui satisfont bien un nombre important de critères. Mais, leur utilisation à terme pour le développement des CP nécessite la mise sur pied d'un ensemble de mesures afin de rattraper le déficit de performance observé sur certains critères. Par exemple, les essences Angeuk et Difou pourraient facilement passer dans la catégorie des « Elevés » si les

actions sont menées en ce qui concerne l'amélioration de la régénération de l'Angeuk et de la déroulabilité du Difou.

La stratégie C minimise l'importance des critères relatifs au potentiel de renouvellement des essences et à la déroulabilité. C'est pour cela que des essences de bois très durs comme l'Oboto et l'Eveuss, figurent dans la catégorie des espèces intéressantes. Cette stratégie ne semble pas réaliste, car elle suppose des acquis maîtrisés sur les plans de la transformation des bois très durs et de la reconstitution des espèces exploitées sur une période de 30 ans. La stratégie A aboutit à l'émergence de deux espèces menacées d'extinction dans la catégorie « Intermédiaire », à savoir le Bilinga et le Doussié. Elle apparaît donc comme une démarche de choix biaisée sur le plan écologique. Les stratégies B, D et E peuvent être raisonnablement appliquées dans l'optique d'une production durable des contreplaqués du BC. La stratégie B est plus favorable aux industriels locaux, car elle met au second plan les bois durs dont la déroulabilité est difficile. Ces stratégies font émerger une grande diversité d'essences de bois utilisables en contreplaqué à l'instar du Kanda en classe d'usage 3 ou 2, le Diana Z en classe d'usage 1.

### 2.5.2 Mise au point de nouvelles bases de données sur les contreplaqués réalisables à base d'espèces tropicales du BC

Les bases de données actuellement disponibles ne permettent pas de renseigner correctement les données relatives aux espèces ligneuses du BC, et concernant des critères en marge des aspects technologiques. La compilation des données préalables à l'analyse multicritère permet clairement de combler ce déficit sur un ensemble de 82 espèces ligneuses. Ces données se présentent en effet sous la forme d'une matrice de 82 lignes et 12 colonnes, chaque colonne permettant de renseigner un critère donné. De plus, les résultats des méthodes ELECTRE en général et de la méthode ELECTRE TRI-B en particulier apparaissent comme des métadonnées décisionnelles, rangées en trois catégories, ce qui facilite leur compréhension et leur utilisation par des décideurs (Oum et al., 2018).

Avant la mise en œuvre des méthodes ELECTRE III et TRI-B, de nombreuses données ont été analysées.

### 2.5.3 Apport de l'outil multicritère dans l'amélioration des pratiques forestières.

La mise en œuvre des résultats multicritères pourrait conduire naturellement à faire émerger des avantages importants pour les différents acteurs de la gestion des ressources ligneuses du BC, parmi lesquels l'augmentation du volume des prélèvements à l'hectare. Situé actuellement entre 3

et 12 $m^3$ à l'hectare (au plus 2 arbres par hectare), le niveau d'exploitation des essences de bois en Afrique centrale est faible, comparativement à celui des pays d'Asie du Sud-Est par exemple, le volume prélevé à l'hectare peut atteindre 100 $m^3$, soit environ 12 arbres abattus par hectare (Karsenty, 2005). Une incrémentation durable de l'intensité de la production ligneuse est donc possible, d'autant plus que le potentiel réel se situe à 50 $m^3$ à l'hectare (Parlement Européen, 1996). Prenons l'exemple des essences de la catégorie des consensus élevés. Dans le cas du Cameroun, 20 essences apparaissent comme les plus récoltées (Annexe 2.7). Dans ce nombre, deux essences de la catégorie des compromis intermédiaires seulement représentent 9,14 % des prélèvements en classe d'usage 3 et 2 : le movingui et le dabéma. Au regard des essences exploitées pour la fabrication des CP (Annexe 2.8), on relève que la contribution des essences comme le kanda, le bété, le limbali, le longhi, le lotofa et le niové, est marginalisée alors qu'elles sont abondantes.

L'accroissement de l'intensité d'exploitation favorise également le renouvellement d'un grand nombre d'essences traditionnelles. Il permet également d'opérer la nécessaire transition entre le modèle « extensif et hyper sélectif » d'exploitation forestière à un modèle intensif et plus équilibré (Karsenty, 2005). L'intensification du développement des contreplaqués en particulier, constitue donc à notre avis un levier intéressant à activer pour la réussite de cette transition. Toutefois, il est nécessaire de bien définir les plafonds de volumes à prélever par hectare.

## Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la construction d'une méthodologie permettant de hiérarchiser les choix d'essences de bois, aidant à développer durablement les ETWP de type Contreplaqué. 82 essences ont été investiguées sur la base des critères écologiques (statut de conservation, potentiel exploitable, potentiel de régénération naturelle post-exploitation), d'ingénierie du bois (aptitude au collage traditionnel, durabilité naturelle ou conférée, déroulabilité, rétractabilité, direction des fibres, résistance mécanique) et d'utilisation alternative de la ressource ligneuse. L'analyse multicritère a permis de catégoriser la sélection des essences selon leur niveau de consensus entre des objectifs conflictuels pour la plupart. Trois catégories d'essences ont été ainsi identifiées pour chacune des classes d'usage 1 (milieu intérieur et sec), 2 (milieu humide) et 3 (milieu extérieur) : elles sont labélisées « Consensus élevé », « Consensus intermédiaire » et « Consensus faible ». Pour une classe d'emploi donnée, chaque catégorie représente un niveau de consensus qui donne des informations détaillées sur la capacité d'une essence à satisfaire de manière significative l'ensemble des critères retenus. Dans la première catégorie, les essences de bois maximisent globalement les critères. La seconde concerne les essences qui satisfont bien à un nombre important de critères, mais leur valorisation en CP nécessite à terme la mise en œuvre de certaines mesures de

compensation comme le suivi de la régénération naturelle. La dernière catégorie regroupe les espèces qui ne satisfont pas à un nombre suffisant de critères, donc non éligibles à une valorisation en CP. Le tableau ci-dessous présente selon les classes de service les essences présentant de niveau de consensus élevé et intermédiaire et de leur usage actuel.

| **Classe de Service** | **Niveau de consensus Elevé** | | **Niveau de consensus Intermédiaire** | |
|---|---|---|---|---|
| | **Essences déjà exploitées en CP** | **Essences non exploitées en CP** | **Essences déjà exploitées en CP** | **Essences non exploitées en CP** |
| **1** | Aningre A, Ayous, Fromager, Ilomba, Lotofa, Onzabili K | Bete, Dabema, Diana Z, Ebiara yde, Gombe, Kanda, Limbali, Longhi, Mambode, Niove, | Eyong, Frake, | Angueuk, Awoura, Bongo H, Difou, Ekaba, Etimoe, Eveuss Kotibe, Landa, Movingui, Oboto, Tali. |
| **2** | Lotofa,. | Bete, Bomanga, Dabema, Ebiara yde, Kanda, Limbali, Mambode | | Angueuk, Awoura Bongo H, Ekaba, Niove, Landa, Longhi, Movingui Oboto |
| **3** | Lotofa | Bete, kanda, limbali | | Bomanga, Bongo H, Dabema, Ebiara yde, Longhi, Mambode, Movingui, Niové, Oboto, Mambode |

Cette hiérarchisation rend possible l'accroissement de l'intensité d'exploitation et peut contribuer de manière significative à un prélèvement intensif et équilibré de la ressource ligneuse, ainsi qu'à l'amélioration de l'accessibilité aux essences pour le développement raisonné des contreplaqués. La validation de ces résultats constitue une démarche étape ultime de valorisation des essences en CP par les principaux acteurs du développement des ETWP. Cette démarche passe par la modélisation du comportement mécanique

# CHAPITRE 3 : MODELISATION ET VALIDATION EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES CONTREPLAQUÉS AU COURS DU SECHAGE

Introduction ..... 71

3.1 Modélisation du comportement hygromécanique du CP au cours du séchage ..... 72

3.2 Implémentation du modèle dans le code cast3m ..... 83

3.3 Identification et détermination expérimentale des paramètres du modèle rhéologique global ..... 85

3.4 Validation du modèle numérique ..... 92

3.5 Discussion ..... 105

Conclusion ..... 106

# Introduction

Parmi les étapes de la transformation du CP, le séchage des plis déroulés de bois avant leur encollage constitue la phase la plus importante sur laquelle dépendent de nombreux facteurs de l'industrialisation qui en suit. Au premier rang des principaux procédés de séchage utilisés, on distingue : le séchage par déshumidification (température sèche entre 35°C et 75°C), le séchage conventionnel (température sèche entre 50°C et 100°C) et le séchage à haute température (température sèche supérieure à 100°C). Malgré cette diversité, la qualité des plis peut être fortement dégradée par l'apparition des fentes et des déformations parfois sévères. Ces défauts peuvent engendrer, suivant la nature et la qualité des bois en présence, des contraintes internes, des collapses susceptibles de contrarier fortement le processus de collage des plis et l'emploi efficace des contreplaqués (Villère, 1964). La présence de tensions internes au cours du séchage est causée par la distribution non uniforme de l'humidité dans la masse du bois due à sa structure hétérogène et à la formation inévitable de gradients d'humidité induits par le mouvement de l'eau vers la surface. Un enjeu majeur consiste à s'assurer d'une part que les contraintes développées au cours du séchage n'excèdent jamais le seuil de rupture du bois ; d'autre part, il est question d'éviter les dégradations excessives par rapport au comportement structural et à l'aspect visuel. La connaissance de l'état de contraintes dans le bois au cours du processus de séchage est très importante pour le contrôle de la qualité de produit et la vitesse de séchage. Malgré cette importance capitale pour les industriels, l'évolution de l'état des contraintes dans l'ensemble des plis est encore peu connue, notamment à cause de la complexité de la structure du bois et de son comportement thermo-hygro-mécanique. Dans le cas du CP collé à l'état vert ou ressuyé, puis séché, la compréhension des phénomènes est encore plus ardue en raison de la superposition des couches minces de bois. Pour toutes ces raisons, nous devons développer une meilleure connaissance de l'évolution de l'état de contraintes dans le CP, afin de déterminer les conditions de séchage qui permettent de le maintenir à l'état désirable vis-à-vis des gauchissements et des fissurations. La simulation numérique du développement des contraintes et déformations au cours du séchage choisie, s'appuie essentiellement sur des modèles mathématiques existants décrivant le comportement mécanique du bois au cours du séchage. Ces modèles doivent décrire simultanément les transferts de masse et de chaleur au séchage, ainsi que le comportement mécanique du bois en réponse aux déformations engendrées par lesdits transferts. Il faut donc développer un modèle rhéologique et numérique d'estimation des champs de contraintes et déformations du bois au cours du séchage des contreplaqués en dessous du point de saturation des fibres (PSF) du bois, afin d'obtenir un outil additionnel pour définir les programmes de séchage et les appliquer. L'essence

choisie pour cette étude est le bété (*Mansonia Altissima)* du fait qu'elle est la meilleure essence issue de l'étude multicritère et qu'elle soit une essence encore non utilisée pour le CP.

## 3.1 Modélisation du comportement hygromécanique du CP au cours du séchage

L'analyse du comportement hygromécanique au cours du séchage des bois massifs et des panneaux de bois lamellés croisés a été investigué par des auteurs comme (Ormarsson et al. 1999), Moutee (2006) et Gereke (2009). Toutefois, les résultats obtenus n'ont pas encore été étendus au contreplaqué qui se distingue des produits cités précédemment par une épaisseur des plis faible et un process de fabrication différent.

L'une des principales motivations de la modélisation dans cette thèse est la possibilité de réaliser des simulations par éléments finis pour comprendre comment la structure interne et les propriétés du matériau affectent l'intégrité matérielle et la stabilité géométrique du CP. L'élaboration du modèle de comportement hygromécanique des CP est déclinée en quatre étapes, à savoir : la diffusion hydrique dans le CP pendant le séchage, la prise en compte des aspects hygromécaniques, le calage du modèle rhéologique global et la prise en compte du temps (approche incrémentale).

### 3.1.1 Modèle de diffusion hydrique dans le contreplaqué pendant le séchage

La diffusion hydrique est un phénomène de transport d'eau dans le bois des zones les plus humides vers les zones plus sèches.

#### 3.1.1.1 Loi de diffusion

Le processus de diffusion peut être traité par des approches à la fois analytiques et expérimentales en utilisant la loi de Fick. Dans des conditions isothermes, l'équation de Fick s'écrit sous la forme tridimensionnelle comme suit (équation 3.1) :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \vec{\nabla}\left(\overline{\overline{K_D(w)}}\vec{\nabla}(w)\right) \qquad \textit{(eq 3.1)}$$

L'expression de la seconde loi de Fick unidirectionnelle dans la direction z (direction radiale) est

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial z}\left(K_D(w)\frac{\partial w}{\partial z}\right) \quad \forall \ t, z \qquad \textit{(eq 3.2)}$$

Où $K_D$ : le coefficient de diffusion

w : teneur en eau

z : direction de diffusion

t : temps

### 3.1.1.2 Conditions aux limites de la diffusion

D'après la littérature Yéo (2002), le transport de l'eau dans le bois est gêné par deux freins :

- Une résistance interne qui se développe dans le corps des structures et qui peut être décrite par le coefficient de diffusion : $K_D$
- Une résistance externe qui se développe à l'interface entre la surface de la structure et l'ambiance externe et qui peut être décrite par le coefficient d'échange surfacique $K_C$.

Ces deux paramètres conditionnent l'évolution de l'humidité dans le bois. Il importe donc de les relier par l'équation du flux de masse d'eau échangée entre l'intérieur et l'extérieur. Soit $z \in [0\,,\ a]$ où a est la moitié de l'épaisseur de l'échantillon. Du fait de la symétrie du problème, les conditions aux limites peuvent s'écrire (équation 3.3):

$$-K_D\left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)_a = K_C\left(w_{surf} - w_{eq}\right) \qquad pour\ \forall\ t, et\ z = a \qquad \textit{(eq 3.3)}$$

$W_{surf}$ désigne la teneur en eau à la surface de l'échantillon;

$w_{eq}$ désigne la teneur en eau à l'équilibre hygroscopique.

Les conditions aux limites associées à l'équation de diffusion de masse s'écrivent littéralement dans le cadre unidirectionnel par le système d'équations suivant (équations 2.4) :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial w}{\partial t} = \dfrac{\partial w}{\partial z}\left(K_D(w)\dfrac{\partial w}{\partial z}\right)\ avec\ \ 0 < z < a \\ w\ =\ w_{ini}\ \ pour\ \ z \in\ [0\,,\qquad a]\ \text{à}\ t = 0 \\ K_D(w)\dfrac{dw}{dz} = K_C\left(w_{surf} - w_{eq}\right) = Q_m;\ (z = a, t > 0) \end{cases} \qquad \textit{(eq 3.4)}$$

Où : Qm est le flux de teneur surfacique en $m.s^{-1}$,

## 3.1.2 Modélisation du comportement hygromécanique

Le comportement hygromécanique prend en compte les aspects élastiques, viscoélastique mécanosorptif.

### 3.1.2.1 Modèle mécanique élastique

Les propriétés du bois étant considérées purement élastiques, le tenseur total de déformation peut être additivement décomposé en deux parties comme indiqué dans l'équation (3.5) :

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_e + \varepsilon_w \qquad \textit{(eq 3.5)}$$

$\varepsilon_{tot}$ est le tenseur total de déformations ; $\varepsilon_e$ est le tenseur de déformations élastiques;

$\varepsilon_w$ désigne le tenseur de déformations hydriques.

Pour rappel, le bois est un matériau anisotrope de type orthogonal et cylindrique. De ce fait, la composante de la déformation est donnée par l'équation 3.6 :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_R \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{TR} \\ \gamma_{LR} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & \frac{1}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_R \\ \tau_{LT} \\ \tau_{TR} \\ \tau_{LR} \end{pmatrix} \qquad \textit{(eq 3.6)}$$

avec :

– $\varepsilon_L, \varepsilon_T, \varepsilon_R$ : déformations élastiques selon les directions L, T et R ;

– $\gamma_{LT}, \gamma_{TR}, \gamma_{LR}$ : glissements selon les trois plans de cisaillement ;

– $E_L$; $E_T$, $E_R$; : modules d'élasticité dans les trois directions L, T et R ;

– $G_{LT}$ ; $G_{TR}$ ; $G_{LR}$ : modules de cisaillement selon les trois plans,

– $\upsilon_{LR}$; $\upsilon_{RL}$; $\upsilon_{TL}$ : coefficients de Poisson,

– $\sigma_L$; $\sigma_T$, $\sigma_R$ : contraintes normales dans les trois directions L, T et R ;

– $\tau_{RT}$ ; $\tau_{LT}$ ; $\tau_{LR}$ : contraintes de cisaillement selon les trois plans.

Pour un matériau orthotrope, la matrice de complaisance élastique est symétrique. Nous pouvons donc établir que les constantes élastiques vérifient l'équation 3.7 :

$$\frac{\upsilon_{RT}}{E_R} = \frac{\upsilon_{TR}}{E_T}, \qquad \frac{\upsilon_{RL}}{E_R} = \frac{\upsilon_{LR}}{E_L}, \qquad \frac{\upsilon_{TL}}{E_T} = \frac{\upsilon_{LT}}{E_L} \qquad \textit{(eq 3.7)}$$

Les modules d'Young présentent une légère croissance lorsque le taux d'humidité évolue de l'état anhydre jusqu'aux environs de H=5%, puis décroissent quasi-linéairement entre 8 à 20%. Au-delà du Point de Saturation des Fibres (PSF), les modules d'élasticité se stabilisent. La dépendance à la teneur en eau des modules est prise en compte en utilisant les relations établies par Guitard et al (1987).

Sur le plan pratique, pour des humidités voisines de 12% dans un intervalle de variation entre H=5% et H = $H_{PSF}$ (Point de Saturation des fibres), l'influence du taux d'humidité H sur les propriétés élastiques des bois standards est prise en compte par une correction linéaire sur les modules d'élasticités par la forme de l'équation 3.8 (Guitard, 1987) :

$$\begin{cases} E_L(\mathrm{H}) = E_L(12)[1 - 0{,}03(\mathrm{H} - 12)] \\ E_R(\mathrm{H}) = E_R(12)[1 - 0{,}03(\mathrm{H} - 12)] \\ E_T(\mathrm{H}) = E_T(12)[1 - 0{,}03(\mathrm{H} - 12)] \end{cases} \quad et \begin{cases} G_{RT}(\mathrm{H}) = G_{RT}(12)[1 - 0{,}03(\mathrm{H} - 12)] \\ G_{TL}(\mathrm{H}) = G_{TL}(12)[1 - 0{,}03(\mathrm{H} - 12)] \\ G_{LR}(\mathrm{H}) = G_{LR}(12)[1 - 0{,}03(\mathrm{H} - 12)] \end{cases} \quad \textit{(eq 3.8)}$$

Par ailleurs, les valeurs des déformations hydriques sont déterminées par la relation suivante à partir des données du CIRAD (équation 3.9) :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_w^L \\ \varepsilon_w^T \\ \varepsilon_w^R \end{pmatrix} = \delta w \begin{pmatrix} \alpha_L & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_T & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \qquad \textit{(eq 3.9)}$$

- $\varepsilon_w^L, \varepsilon_w^T\ et\ \varepsilon_w^R$ correspondent respectivement aux valeurs des déformations dans les directions longitudinale, radiale et tangentielle induites par une variation de teneur en eau,

- $\delta w$ correspond à la variation de la teneur en eau (%),

-$\alpha_L$, $\alpha_T\ et\ \alpha_R$ correspondent respectivement aux coefficients de retrait dans les directions longitudinale, tangentielle et radiale. Pour le bété par exemple, la valeur du retrait dans la direction radiale est d'environ 0,164% par perte de 1% de teneur en eau et d'environ 0,264% par perte de 1% de teneur en eau dans la direction tangentielle. Le retrait dans la direction longitudinale quant à lui, est quasiment nul de l'ordre 0,001%.*(CIRAD, 2011).*

### 3.1.2.2 Modèle mécanique viscoélastique et mécanosorptif

Les études relatives au fluage du bois réalisées par Armstrong et al (1960) ont montré que les déformations enregistrées dans le bois soumis à une contrainte constante dans un environnement

à humidité relative variable sont deux fois plus importantes que celles du bois soumis à la même contrainte avec humidité relative constante. Face à ces constats, plusieurs interprétations phénoménologiques ont été proposées (Pittet, 1996):

- soit les mécanismes se situent principalement au niveau moléculaire et sont liés aux processus de rupture et de déformation de liaisons hydrogènes des régions amorphes des chaînes de cellulose,

- soit ils se situent principalement au niveau de la microstructure du bois et sont liés à la configuration ou à l'orientation des micro-fibrilles dans la couche de la paroi cellulaire (Meylan, 1972)

Le fluage du bois sous un climat variable est également connu sous le nom de comportement mécanosorptif (Pittet 1996, Randriambololona 2003). Dans une approche thermodynamique, plusieurs modèles ont été décrits pour simuler le fluage du bois dans un environnement variable. Ces modèles découlent soit du modèle de Maxwell soit de celui de Kelvin-Voigt. Globalement, deux concepts sont envisagés selon la répartition des déformations retenues :

- les modèles à activation indépendante (équation 3.10):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e(\mathrm{t}) + \varepsilon_{ve}(\mathrm{t}) + \varepsilon_{ms}(t) + \varepsilon_{w0}(\mathrm{t}) + \varepsilon_{w\sigma}(\mathrm{t}) \qquad \textit{(eq 3.10)}$$

- les modèles à activation combinée (équation 3.10):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e(\mathrm{t}) + \varepsilon_{ve+ms}(\mathrm{t}) + \varepsilon_{w0+w\sigma}(t) \qquad \textit{(eq 3.11)}$$

Où $\varepsilon_e$ (t) est la réponse élastique instantanée en déformation ; $\varepsilon_{ve}$(t) et $\varepsilon_{ms}$(t) représentent les déformations découplées viscoélastiques et mécanosorptives. La forme couplée est représentée par $\varepsilon_{ve+ms}$(t). L'effet de retrait-gonflement peut être partagé en termes de retrait/gonflement libre $\varepsilon_{w0}$(t) et de retrait-gonflement sous charge $\varepsilon_{w\sigma}$(t) ou couplé en la forme $\varepsilon_{w0+w\sigma}$(t).

**a.** Modèles rhéologiques à activation indépendante

La représentation des modèles à activation indépendante, développée par Leicester (1971) et Ranta-Manaus (1975), est basée sur une cellule de Kelvin-Voigt. Un deuxième amortisseur (Figure 3.1) est utilisé pour traduire le retrait gonflement et l'effet mécanosorptif et se traduit par la loi de comportement suivante (équation 3.12):

$$\frac{d\varepsilon_{ms}}{dw} = \mathrm{m}.\sigma \qquad \textit{(eq 3.12 )}$$

Le coefficient *m* permet de modéliser l'effet de retrait-gonflement et les deux accélérations de déformation durant la première phase d'humidification sous charge ou après déchargement.

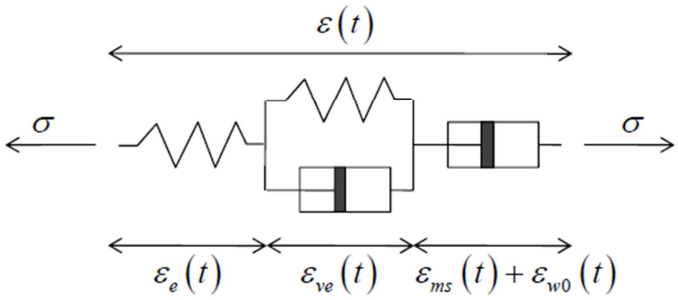



*Figure 3.1 : Modèle à activation indépendante*

Dans ce contexte, Ranta-Manaus (1975) a introduit deux paramètres notés $m^+$, $m^{++}$(pour le fluage sous charge) et deux autres notés m− , m− − (pour la phase de recouvrance) . Ces paramètres sont illustrés sur la figure 3.2. Ils permettent de différencier les effets de la première humidification après chargement et déchargement.

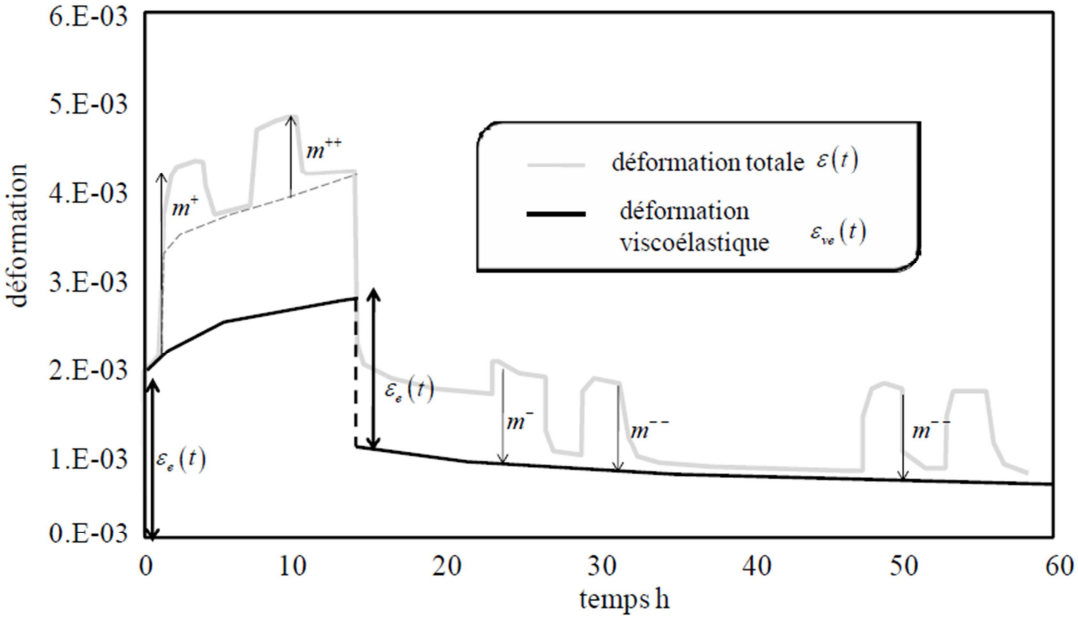



*Figure 3.2 : Réponse du modèle de Ranta-Manaus*

Les deux auteurs considèrent la loi de Bazant (1979), pour la réponse élastique (équation 3.13).

$$\dot{\varepsilon_e}(\mathrm{t}) = \frac{\dot{\sigma}(t)}{k} \qquad \textit{(eq 3.13)}$$

Afin de prendre en compte l'évolution temporelle de la déformation induite par les variations de teneur en eau interne, Hunt (1984, 1988), Yahiaoui (1991) et Salin (1992) ont généralisé cette approche en remplaçant l'amortisseur isolé par une deuxième cellule de Kelvin-

Voigt ( figure 3.3). Ces modèles mettent en évidence le fluage pendant les phases de chargement mécanique ou après déchargement. Le dernier amortisseur est piloté par les variations hydriques et non plus par les variations temporelles.

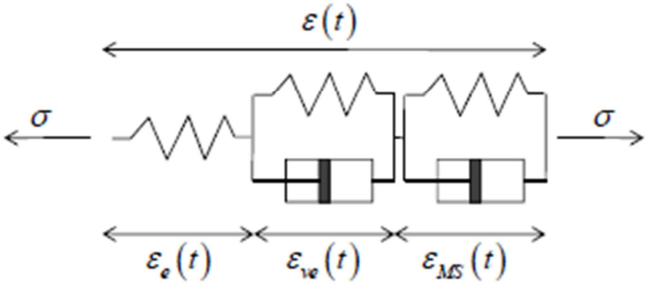



*Figure 3.3 : Modèle généralisé à activation indépendante*

Les différents modèles illustrés par les figures 3.2 et 3.3 considèrent des propriétés de fluage pour de faibles niveaux de teneur en eau et ne peuvent pas traduire la dépendance des propriétés viscoélastiques à la teneur en eau. Toratti (1992) et Martensson (1997) ont introduit une accélération du fluage en fonction de la teneur en eau mais leurs modèles ne permettent pas de prendre en compte l'assouplissement du matériau durant les phases d'humidification et la rigidification au cours de séchage.

**b.** Modèles rhéologiques à activation combinée

Hunt (1999), Bazant (1985) et Hanhijarvi (1995) ont proposé une forme couplée des déformations viscoélastiques et mécanosorptives $\varepsilon_{ve+ms}(t)$ représentée sur la figure 3.4.

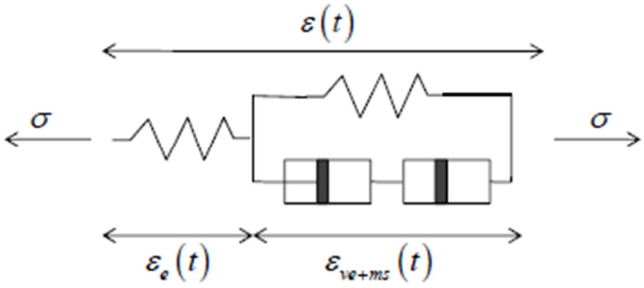



*Figure 3.4 : Modèle de à activation combinée*

Ces modèles physiques basés sur des concepts thermodynamiques permettent de prendre en compte l'énergie d'activation entre molécules. Le transfert de masse ou de chaleur peut piloter la réponse en fluage et le niveau de teneur en eau peut être introduit dans la réponse viscoélastique. Dans ce cas, le découplage entre la réponse et les effets de retrait-gonflement est illustré sur la figure 3.5.

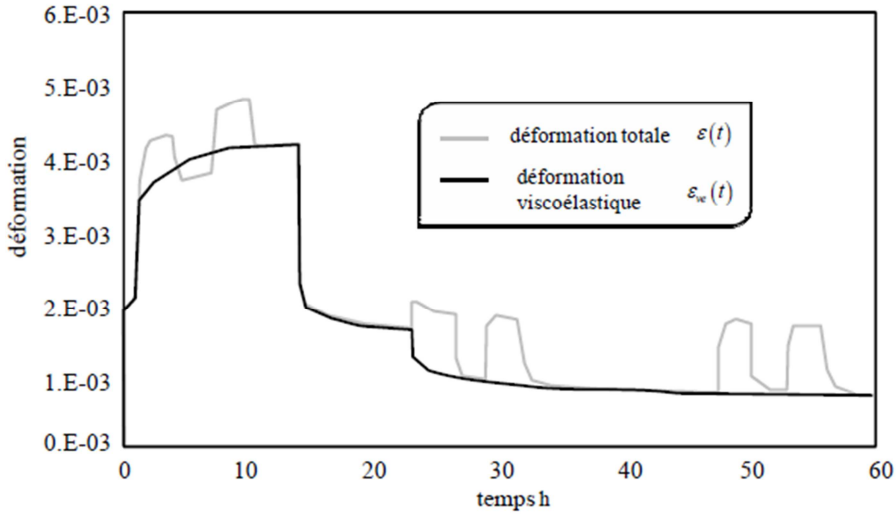



*Figure 3.5 : Réponse viscoélastique des modèles à activation combinée*

Afin de traduire ce comportement, Mukuday (1986) a proposé l'utilisation simultanée de deux modèles rhéologiques (figure 3.6). Le premier caractérise le matériau à l'état sec, le second à l'état humide. Le point d'application de la contrainte va se déplacer en fonction de l'évolution de la teneur en eau en déséquilibrant, par un « effet levier », la distribution des contraintes dans les deux branches en fonction du niveau hydrique considéré.

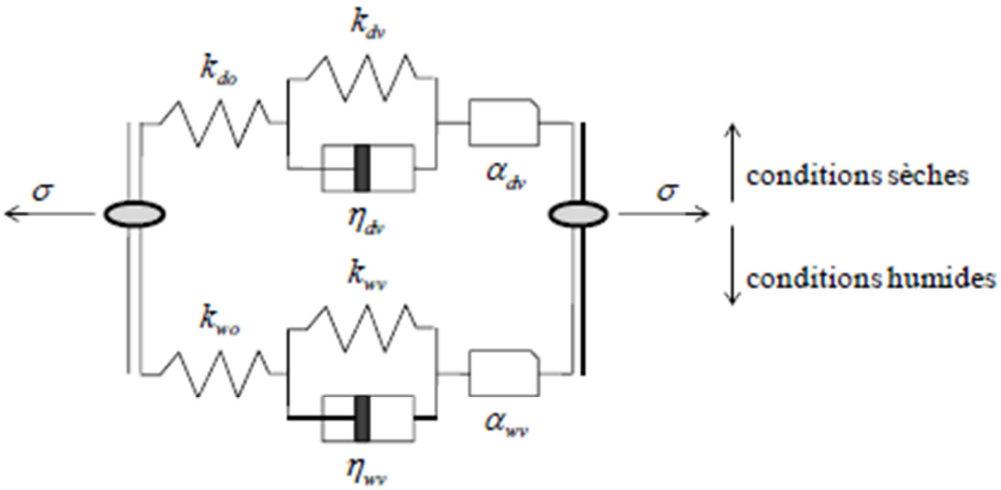



*Figure 3.6 : Modèle de Mukuday*

Ce modèle reproduit les phénomènes physiques à l'échelle de la fibre. Il combine les effets viscoélastiques et de retrait-gonflement. Cependant, ce modèle ne peut reproduire les effets de blocage des déformations durant les phases de déchargement pour de faibles teneurs en eau. Dans ce contexte, Gril (1988) a proposé un modèle basé sur un concept d'hygro-verrou (figure 3.7). Comme celui de Mukuday, ce modèle permet de traduire le comportement physique à l'échelle de la fibre. Ce modèle intègre *n* modèles de Maxwell, chacun étant en parallèle avec un amortisseur.

La viscosité $\eta_i^{HL}$ de chaque amortisseur est caractérisée pour un seuil particulier de teneur en eau. Ce sont les amortisseurs qui génèrent les effets de blocage de déformation.

$$\eta_i^{HL} = 0 \text{ pour w } \geq w_i \text{ et } \eta_i^{HL} \rightarrow +\infty \text{ pour w} < w_i \qquad \textit{(eq 3.14)}$$

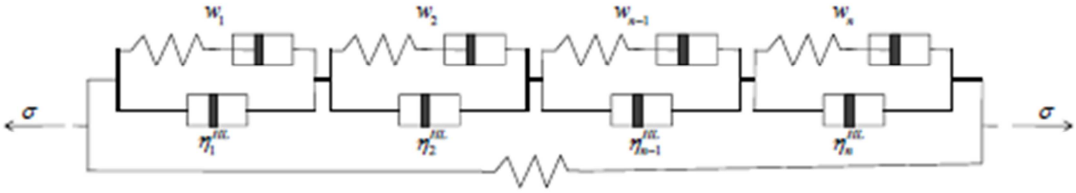


*Figure 3.7 : Modèle de Gril*

### 3.1.2.3 Choix du modèle rhéologique global

Dans le cas d'étude dans ce chapitre, seule la phase de séchage est mise en valeur. En admettant que le module d'élasticité du bois est influencé uniquement par la teneur en eau interne w, il peut se mettre sous la forme :

$$\mathrm{E(t)} = \mathrm{E}\big(\mathrm{w(t)}\big) \text{ avec } \begin{cases} \dot{w} \geq 0 \;\; et \;\; \dot{E} \leq 0 \\ \dot{w} \leq 0 \; et \;\; \dot{E} \geq 0 \end{cases} \qquad \textit{(eq 3.15)}$$

La variable temps ne sert qu'à synchroniser les variations de chargement et celles de l'humidité. La loi de comportement élastique de Hooke s'écrit alors :

$$\sigma(t) = E(t).\varepsilon(t) \qquad \textit{(eq 3.16)}$$

D'après les travaux de Randriambololona (2002) et Dubois (2004), la loi de Hooke ne peut s'appliquer sans restriction que dans le cas où le module d'élasticité s'adoucit (humidification). Pour décrire le comportement mécanique pendant les phases de séchage, ceux-ci ont plutôt utilisé la loi de Bazant (1979, 1999), qui s'écrit comme suit (équation 3.17):

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} = E(t).\frac{d\varepsilon(t)}{dt} \; avec \; \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \geq 0 \qquad \textit{(eq 3.17)}$$

La forme dérivée de la déformation à partir de l'équation (3.16) de la loi de Hooke donne :

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} = E(t).\frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \frac{dE(t)}{dt}\varepsilon(t) \qquad \textit{(eq 3.18 )}$$

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{\frac{d\sigma(t)}{dt} - \frac{dE(t)}{dt}\varepsilon(t)}{E(t)} \; or \; \varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} \qquad \textit{(eq 3.19)}$$

Il vient :

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{\frac{d\sigma(t)}{dt} - \frac{dE(t)}{dt} \cdot \frac{\sigma(t)}{E(t)}}{E(t)} \qquad or\ E(t) = E\big(w(t)\big) \qquad \textit{(eq 3.20)}$$

Soit :

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{\frac{d\sigma(t)}{dt} - \frac{dE\big(w(t)\big)}{dw}\frac{dw}{dt} \cdot \frac{\sigma(t)}{E(t)}}{E(t)} \qquad \textit{(eq 3.21)}$$

La déformation élastique est donnée par la loi de Hooke, fonction de la teneur en eau, pourrait ainsi s'écrire :

$$\dot{\varepsilon}_e = \dot{\varepsilon}_e^{\sigma} + \dot{\varepsilon}_e^{w} = \frac{\dot{\sigma}}{E(w)} + \left(-E'(w)\dot{w}\ \frac{\sigma}{E^2(w)}\right) \qquad \textit{(eq 3.22)}$$

où $\dot{\varepsilon}_e^{\sigma} = \dot{\sigma}\ /E(w)$ est la variation de la déformation élastique due à la variation de la contrainte $\dot{\sigma}$ et $\dot{\varepsilon}_e^{w}$est la variation de la déformation élastique due à la variation du module engendrée par la variation de la teneur en eau.

En phase de séchage sous contrainte, la déformation de type hygroverrou apparaît comme le résultat de l'effet de blocage temporaire de la déformation élastique. Ce blocage est confirmé par des observations expérimentales (Gril, 1988). En d'autres termes :

$$\forall\ \dot{w} < 0\ \ (\dot{\varepsilon}_e + \dot{\varepsilon}_{HL})_{\dot{\sigma}=0} = (\dot{\varepsilon}_e^{\sigma} + \dot{\varepsilon}_e^{w} + \dot{\varepsilon}_{HL})_{\dot{\sigma}=0} = 0$$

D'où : $\dot{\varepsilon}_{HL}|_{\dot{w}<0} = -\dot{\varepsilon}_e^{w} = E'(w)\dot{w}\ \sigma\ /E^2(w)$ *(eq 3. 23)*

$\dot{\varepsilon}_{HL}|_{\dot{w}<0}$ traduit l'évolution de la déformation hygro verrou au cours du séchage.

L'équation 3.23 montre que le blocage de la déformation au cours du séchage peut être expliqué par la déformation de type hygroverrou, laquelle évolue de manière à compenser l'évolution $\dot{\varepsilon}_e^{w}$de la partie de la déformation élastique due à la rigidification du module élastique en phase de séchage. Cette équation montre également que la déformation hygroverrou n'évolue pas ($\dot{\varepsilon}_{HL} = 0$ ) lorsque l'humidité est constante ($\dot{w}\ = 0$), quelle que soit la contrainte mécanique en présence.

Nous notons que seule la partie élastique instantanée, indépendante du temps, est influencée par l'effet hygroverrou. Ainsi, l'on peut associer les modèles des parties élastique et viscoélastique de la déformation en relaxation tout en dissociant de l'effet hygro-verrou représenté dans le modèle

par un « ressort hygro-verrou » (Husson, 2010) et dont la justification expérimentale a été établie par les travaux de Saifouni (2014).

Le modèle choisi pour ces travaux est constitué du couplage de l'effet élasto-viscoélastique du modèle de Maxwell généralisé à r branches, de l'effet hygroverrou et de l'effet du retrait libre. Il est illustré par le modèle rhéologique à une dimension par la figure 3.8 et se traduit par l'équation 3.24 suivante :

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{eve} + \dot{\varepsilon}_{MS} + \dot{\varepsilon}_{w} \qquad \textit{(eq 3.24)}$$

Où : $\dot{\varepsilon}$ est la vitesse de déformation globale; $\dot{\varepsilon}_{eve}$ est la vitesse de déformation élasto-viscoélastique ; $\dot{\varepsilon}_{MS}$ : Vitesse déformation due à l'effet hygroverrou et $\dot{\varepsilon}_{w}$ : Vitesse déformation due au retrait/gonflement.

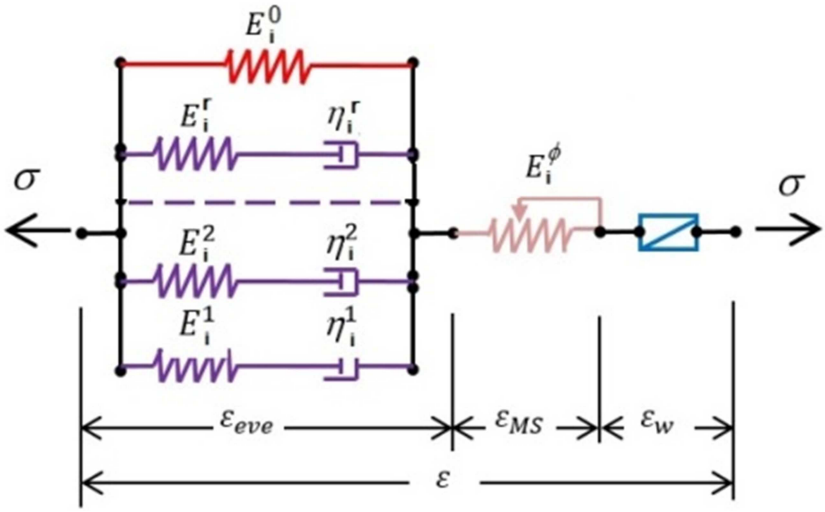



*Figure 3.8 : Modèle rhéologique global à une dimension*

Avec i ∈ {L, T, R}, la direction orthotropique du bois ; $E_i^{\mu}$: module d'élasticité de la branche μ ∈ [1, r] le long de la direction i ; $\eta_i$ : viscosité dans la direction i et $E^0$ : module réel du bois et $E^{\phi}$: module mécanosorptif.

### 3.1.3 Modèle incrémental global

Le modèle rhéologique global a été explicité précédemment à partir des vitesses de déformation résultant des effets considérés (équation 3.24). La prise en compte d'un pas de temps permet de quantifier ces déformations : c'est le modèle incrémental global. Il s'écrit comme l'indique l'équation 3.25 :

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon^{w} + \Delta\varepsilon^{e+c} + \Delta\varepsilon^{ms} \qquad \textit{(eq 3.25)}$$

$\Delta\varepsilon^{w}$ est l'incrément de déformation due au retrait/gonflement du bois lorsqu'il y a variation de la teneur en eau;

$\Delta\varepsilon^{e+c}$ représente l'incrément de déformation élastique et viscoélastique du matériau qui croit avec le temps.

$\Delta\varepsilon^{ms}$ est l'incrément de la déformation mécanosorptive.

## 3.2 Implémentation du modèle dans le code cast3m

### 3.2.1 Diffusion hydrique

La procédure utilisée pour l'étude numérique est celle du calcul non linéaire de transferts thermiques exprimée par l'équation de chaleur existant dans le code de calcul Cast3m. Ainsi, une analogie entre les paramètres régissant les transferts thermiques et ceux régissant les transferts hydriques a été faite. Le transfert de chaleur est décrit par l'équation 3.26 :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla}\left(k\,\vec{\nabla}T\right) \qquad \textit{(eq 3.26)}$$

avec : – ρ : masse volumique en kg.m$^{-3}$

– $C_p$ : chaleur spécifique en J.kg$^{-1}$.K$^{-1}$

– k : conductivité thermique en W.m$^{-1}$.K$^{-1}$

Par analogie, nous pouvons donc considérer une équivalence entre les équations 3.1 (diffusion hydrique) et 3.26 (transfert de chaleur) exprimée par l'équation 3.27:

$$\begin{cases} C_p \dfrac{\partial T}{\partial t} \leftrightarrow \dfrac{\partial\, w}{\partial\, t} \\ \vec{\nabla}\left(k\,\vec{\nabla}T\right) \leftrightarrow \vec{\nabla}\left(\overline{\overline{K_D(w)}}\vec{\nabla}(w)\right) \end{cases} \qquad \textit{(eq 3.27 )}$$

Les paramètres d'entrée dans le code de calcul Cast3m sont : k, ρ et Cp. Dans cette logique, la valeur de k a été remplacée par la valeur du coefficient de diffusion $K_D$, ρ restant inchangée et $C_p$ défini pour vérifier l'égalité ρCp = 1.

Cette analogie est valable aussi au niveau des conditions aux limites. Dans le cas du transfert de chaleur par convection, la condition aux limites est définie dans l'équation 3.28:

$$Q_t = K_t\left(T_{ext} - T_{Surf}\right) \qquad \textit{(eq 3.28)}$$

Qt est flux de chaleur à la surface en W.m$^{-2}$,

$K_t$ désigne le coefficient d'échange par convection en W.m$^{-2}$.K$^{-1}$,

$T_{surf}$ et $T_{ext}$ désignent respectivement les températures à la surface et à l'extérieur du matériau.

Ainsi par analogie, nous pouvons établir les équivalences suivantes (équation 3.29) :

$$\begin{cases} Q_t \leftrightarrow Q_m \\ K_t \leftrightarrow K_C \\ T_{Surf} - T_{ext} \leftrightarrow w_{Surf} - w_{eq} \end{cases} \qquad \textit{(eq 3.29)}$$

La valeur utilisée pour $K_t$ dans le code de calcul Cast3m correspond à la valeur déterminée de $K_c$. Les conditions de température aux limites sont remplacées par des conditions de teneur en eau.

## 3.2.2 Modèle rhéologique global

### 3.2.2.1 Modèle incrémental de l'effet hydrique

Ce phénomène a lieu lorsque la teneur en eau du bois est en dessous du point de saturation des fibres (Wpsf). L'incrément de déformation hydrique est défini par (Equation 3.30) :

$$\Delta\varepsilon^{w} = \alpha\, \Delta w \qquad \textit{(eq 3.30)}$$

où α est le coefficient de retrait/gonflement (indépendant de la teneur en eau) dans la direction d'orthotropie considérée, $\Delta w$ la variation de la teneur en eau.

### 3.2.2.2 Modèle incrémental élasto-viscoélastique

L'incrément de déformation élastique et viscoélastique du matériau, notée $\Delta\varepsilon^{e+c}$, est défini par le modèle de Maxwell généralisé à r branches comme suit (Annexe 3.1) :

$$\Delta\varepsilon^{e+c} = \left[\widetilde{K}\right]^{-1}\Delta\sigma - \left[\widetilde{K}\right]^{-1}\sigma^{his}(t) \qquad \textit{(eq 3. 31)}$$

$$avec\ \widetilde{K} = E^{0}(w)\left[1 + \sum_{\mu=1}^{r}\gamma_{\mu}\left(\frac{1 - e^{-\alpha_{\mu}\Delta t}}{\alpha_{\mu}\Delta t}\right)\right] \quad O\text{ù}\ \gamma_{\mu} = \frac{E^{0}(w)}{E^{\mu}}\ and\ \alpha_{\mu} = \frac{E^{\mu}}{\eta^{\mu}}\ (en\ s^{-1})$$

Pour un pas de temps $\Delta t$,

$$\sigma^{his}(t) = \sum_{\mu=1}^{r}\left(1 - e^{-\alpha_{\mu}\Delta t}\right)\sigma^{\mu}(t) \qquad \textit{(eq 3.32)}$$

$\widetilde{K}$ est la rigidité fictive, dépendante du pas de temps et des paramètres de Maxwell ;

$E^{0}(w)$ est le module élastique (dépendant de la teneur en eau w) au début de chaque incrément.

$E^{\mu}$ *and* $\eta^{\mu}$ sont respectivement le module élastique et la viscosité dans chaque branche et μ le nombre de branches du Modèle de Maxwell. Dans le cas de cette étude μ = 3.

$\sigma^{his}(t)$ est le terme de l'histoire; il dépend de la longueur du pas de temps Δt, et des récentes valeurs gagnées par la contrainte interne de partition $\{\sigma^{\mu}(t)\}$ au début de l'incrément.

#### 3.2.2.3 Modèle incrémental mécanosorptif

La forme incrémentale de la déformation mécanosorptive est basée sur la méthode rhéologique développée par Ormarsson et al.(1999) dont les paramètres indépendants du choix de l'essence sont définis comme suit (équation. 3.33) :

$$\dot{\overline{\varepsilon_{ms}}} = \overline{m}\,.\,\overline{\sigma}|\dot{w}| \qquad \textit{(eq 3.33)}$$

$$\begin{Bmatrix} \dot{\varepsilon}^{l}_{ms} \\ \dot{\varepsilon}^{t}_{ms} \\ \dot{\varepsilon}^{r}_{ms} \\ \dot{\gamma}^{tr}_{ms} \\ \dot{\gamma}^{lr}_{ms} \\ \dot{\gamma}^{lt}_{ms} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m_l & -\mu_{tl}m_t & -\mu_{rl}m_r & 0 & 0 & 0 \\ -\mu_{lt}m_l & m_t & -\mu_{rt}m_r & 0 & 0 & 0 \\ -\mu_{lr}m_l & -\mu_{tr}m_t & m_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{tr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{lr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{lt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_l \\ \sigma_t \\ \sigma_r \\ \tau_{tr} \\ \tau_{lr} \\ \tau_{lt} \end{Bmatrix} |\dot{w}|$$

$m_l = 0.1\ 10^{-3} MPa^{-1}$ $\quad m_t = 0.15\ MPa^{-1}$ $m_r = 0.2\ MPa^{-1}$

$m_{lr} = 0.008\ 10^{-3} MPa^{-1} m_{lt} = 0.008\ MPa^{-1} m_{rt} = 0.8\ MPa^{-1}$

$\mu_{lr} = 0$ $\qquad \mu_{lt} = 0$ $\qquad \mu_{rt} = 1$

La formulation incrémentale est décrite par l'équation 3.34 :

$$\Delta\varepsilon^{ms} = m\,\sigma\Delta w \qquad \textit{(eq3. 34)}$$

avec m : la complaisance mécanosorptive,

L'incrément global et unidimensionnel de la déformation totale peut se mettre sous la forme :

$$\Delta\varepsilon = \alpha\,\Delta w + m\,\sigma\Delta w + \left[\widetilde{K}\right]^{-1}\Delta\sigma - \left[\widetilde{K}\right]^{-1}\sigma^{his}(t) \qquad \textit{(eq 3.35 )}$$

## 3.3 Identification et détermination expérimentale des paramètres du modèle rhéologique global

### 3.3.1 Echantillon

Les échantillons destinés au déroulage sont des billons de bété (*Mansonia Altissima*), prélevés dans la partie camerounaise du Bassin du Congo. Ils ont été acheminés au LaBoMAP, Campus ENSAM de Cluny qui dispose de la ligne de déroulage de l'Equipex Xyloforest.

Les billons de diamètre inférieur à 500 mm et longueur 600 mm environ ont été étuvés pendant 24 heures à une température constante de 60°C (figure 3.9). Cette opération facilite le déroulage tout en limitant au maximum les fissures.

*Figure 3.9 : Opération d'étuvage du Bété*

Les paramètres de coupe retenus sont ceux communément utilisés dans le cas du hêtre (*Fagus sylvatica*) qui est une essence feuillue dite homogène. Les caractéristiques technologiques de ces deux essences de bois sont assez proches (Tableau 3.2). Comme pour les bois tropicaux, la différence de densité entre le bois initial et le bois final est faible. La vitesse de coupe a été fixée à 1m/s soit 60m/min ce qui est un peu faible pour les industriels mais assure des conditions de coupe très favorables tout en minimisant les risques de coincement de placages au niveau du massicot.

*Tableau 3.1 : Quelques caractéristiques physiques et mécaniques du bété et du hêtre à un taux d'humidité de 12 % (CIRAD, 2011)*

| | **Bété** | **Hêtre** |
|---|---|---|
| Couleur | Brun | Brun clair |
| Densité | 0,66 ± 0,03 | 0,71 ± 0,03 |
| Dureté de Monnin | 3,8 ± 0,9 | 4,2 ± 0,9 |
| Point de saturation des fibres | 28% | 32% |
| Module d'élasticité longitudinal | 13620 ± 1224 MPa | 15300 ± 1050 MPa |
| Module de rupture en flexion | 110 ± 10 MPa | 111 ± 9 MPa |
| Module de rupture en compression* | 60 ± 6 MPa | 57 ± 6 MPa |
| Séchage | Vitesse normale, risque de gerces élevé | Vitesse lente, risques de déformation et de gerces élevés |

L'épaisseur des plis après déroulage a été fixée à 2 mm afin de réaliser des contreplaqués triplis de 6mm d'épaisseur, conformément aux prescriptions du marché. L'angle de dépouille, paramètre essentiel du déroulage a été calé à 1,5° au-delà de 200mm de rayon, pour une variation linéaire de l'ordre d'un degré jusqu'au rayon final (35mm). La pression exercée par la barre de pression (angulaire) a été pilotée par deux côtes horizontales et verticales. On l'exprime souvent en pourcent. Elle signifie que le passage laissé pour le placage est plus réduit que l'épaisseur déroulée.

Le choix qui a été retenu est d'utiliser 8% de pression afin de limiter la fissuration sans endommager l'état de surface et sans engendrer des variations d'épaisseur, tout en limitant les efforts de coupe. Les placages de 60 $cm^2$ ainsi obtenus ont été numérotés, stockés dans une enceinte réfrigérée à 4°C afin de les maintenir au-delà du point de saturation des fibres et éviter le développement fongique.

### 3.3.2 Détermination de l'isotherme de sorption

Pendant le séchage du bois, l'eau qui part en premier est l'eau libre (Chantre, 1993). A un moment donné il n'y a plus d'eau libre et il ne reste que l'eau liée. Le bois atteint à cet instant le point de saturation des fibres qui correspond pour de nombreuses essences à une humidité voisine de 30%. Au-dessous de ce point, le bois se trouve dans le domaine hygroscopique, le séchage s'accompagne d'un retrait du bois.

Le point d'équilibre hygroscopique du bois se définit comme l'humidité vers laquelle tend un échantillon de bois lorsqu'il est placé dans des conditions de températures (Tinf) et d'humidité relative de l'air (HR) définies. Cet équilibre est décrit par une relation macroscopique, reliant la teneur en eau d'équilibre (Weq) à l'humidité relative de l'air appelée isotherme d'absorption/désorption (équation 3.36).

$$W_{eq} = f(HR, T_{inf}) \qquad \textit{(eq 3.36)}$$

Les isothermes d'adsorption/désorption sont en général différentes car le séchage d'un produit entraine des modifications de structure (Jannot, 2003).

Nous avons déterminé expérimentalement l'isotherme de désorption du Bété. 10 échantillons de dimension 20 x 20 x 2 mm ont été placés dans une enceinte dont les conditions hygrométriques de l'air étaient contrôlées. La température était constante et fixée à 40 °C. Pour une humidité relative donnée (plages de variation allant de 95% à 10%), les échantillons ont demeuré dans l'atmosphère contrôlée de l'enceinte jusqu'à la stabilisation de sa masse (ie lorsque la masse cesse de varier), signe que leur équilibre hygroscopique est atteint. Connaissant les masses humide et sèche, on en a déduit sa teneur en eau équivalente Weq. La connaissance du couple (HR, Weq) fournit un point de l'isotherme de désorption.

La figure 3.10 illustre les résultats expérimentaux obtenus ainsi que leur « lissage » à l'aide du modèle de Henderson choisi (équation 3.37).

$$HR = 1 - exp\left[-A(T+B)\left(W_{eq}\right)^{C}\right] \qquad \textit{(eq 3.37)}$$

Avec :

A = 0.14 ; B = 100 ; C = 1.9 et T la température en degré Kelvin.

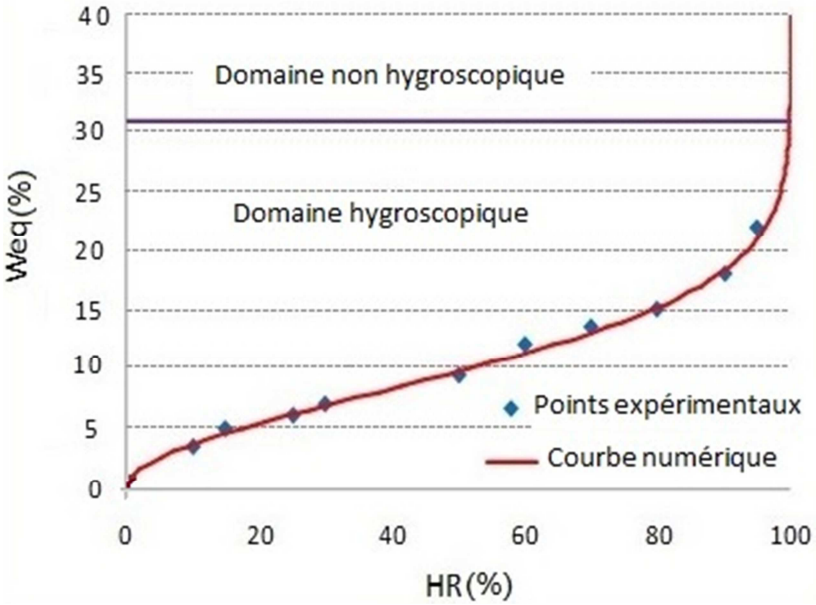



*Figure 3.10 : Isotherme de désorption du Bété*

La figure 3.10 montre que la valeur du PSF obtenu expérimentalement de l'ordre 32% est proche de la valeur bibliographique renseignée par le CIRAD (tableau 3.2). Nous notons aussi que dans notre cas d'étude, les échantillons sont issus d'un seul arbre. Par contre les données du Cirad porte sur les valeurs moyennes des résultats.

## 3.3.3 Détermination expérimentale des propriétés mécaniques des plis

### 3.3.3.1 Protocole expérimental

Les tests de traction ont été effectués sur des plis obtenus après déroulage et conditionnés à une température de 40°C et d'humidité relative de 70% (ce qui correspond à une teneur en eau moyenne d'environ 12% à l'équilibre hygroscopique). Les tests de traction sont inspirés de la norme NF EN 326-1 (1993). Toutefois, une géométrie différente d'éprouvette a été utilisée, car des essais préliminaires ont montré que la rupture avait lieu dans les mors lorsqu'on respectait les dimensions de la norme. L'éprouvette finalement retenue est de type « haltère » (Lavalette, 2014), renforcée par des talons en bois au niveau des mors, afin d'assurer la rupture dans la partie utile de l'échantillon (Figure 3.11). L'éprouvette est découpée dans la direction parallèle aux fibres et dans la direction tangentielle afin d'obtenir les modules d'élasticité dans ces deux directions principales.

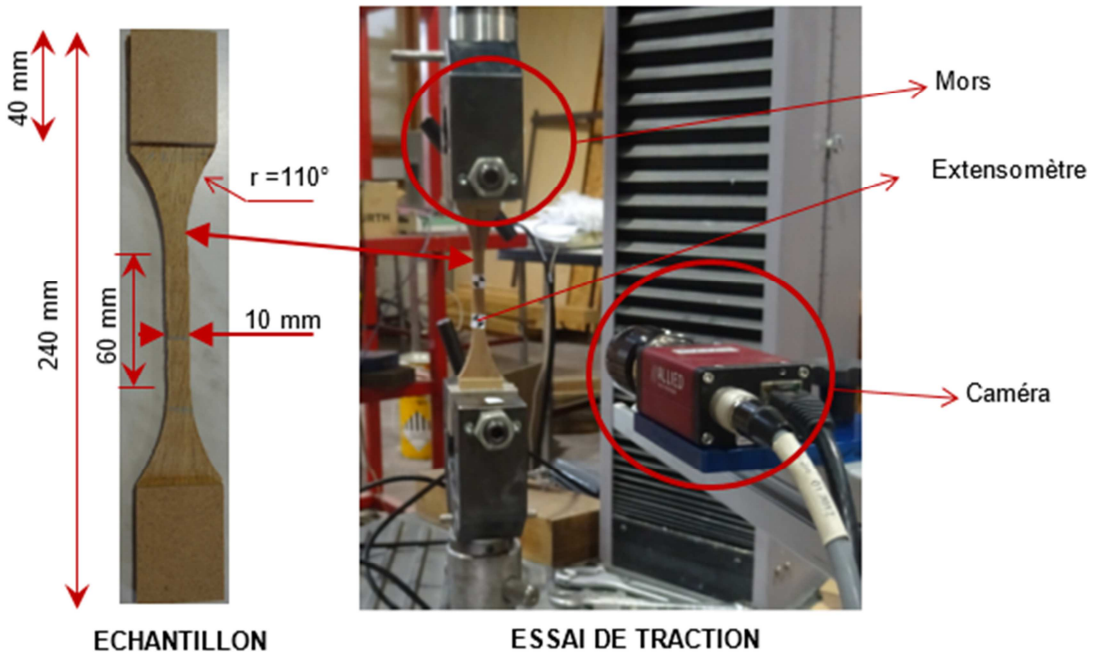
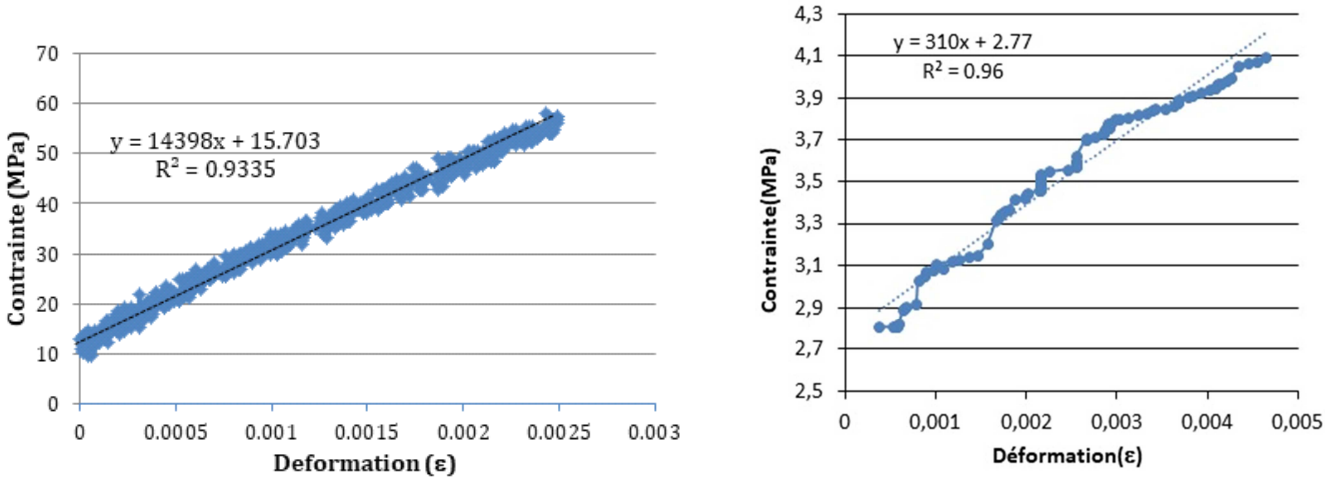



*Figure 3.11 : Géométrie de l'éprouvette et sa disposition sur la machine à traction*

Le déplacement de la traverse est fixé à 2 mm/min. Un extensomètre disposé dans la partie centrale de l'éprouvette permet d'obtenir, via la caméra reliée à l'ordinateur, son allongement au cours de l'essai (Figure 3.11) jusqu'à la rupture. 10 échantillons sont testés pour chaque configuration.

### 3.3.3.2 Résultats

Ces essais permettent de tracer les courbes contrainte/déformation comme l'indique la figure 3.12 dans le cas de la détermination du module longitudinal et tangentiel.




(a) (b)

*Figure 3.12 : Courbe contrainte/déformation relevée au cours d'un essai de traction du pli de bété dans la direction Longitudinale (a) et dans la direction Tangentielle (b).*

Les résultats des essais sont présentés en Annexe 3.2 et les valeurs moyennes dans le tableau 3.2 ci-dessous.

*Tableau 3. 2: Résultats des essais de traction (des plis de bois) longitudinale et perpendiculaire aux fibres*

| **Propriétés** | **Moyenne (MPa)** | **Ecart-type (MPa)** |
|---|---|---|
| MOE longitudinal | 14628 | 128 |
| MOE tangentiel | 310 | 8.54 |
| $\sigma_{RL}$ : Contrainte moyenne de rupture dans le plan RL | 59 MPa | 2.16 |
| $\sigma_{RT}$ : Contrainte moyenne de rupture dans le plan RT | 4,05 MPa | 0.35 |

Ils montrent que le module élastique longitudinal moyen est de l'ordre de 14628 MPa. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle du bois massif (Cirad 2014). Elle correspond à une contrainte moyenne de rupture dans le plan RL de 59 MPa. Les fissures sont orientées parallèlement aux fibres (Figure 3.13).

*Figure 3.13 : Exemple de rupture d'éprouvettes de bété testées dans la direction des fibres*

Dans le sens perpendiculaire aux fibres le module élastique moyen est largement inférieur au module trouvé dans la littérature, avec une valeur de 310 MPa. La présence de fentes de déroulage explique cette différence de valeur pour le MOE selon la direction tangentielle, pour une contrainte moyenne de rupture dans le plan RT de 4 MPa (Figure 3.14).

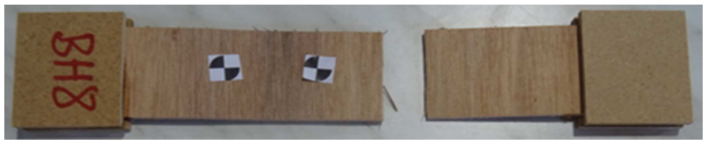



*Figure 3.14 : Exemple de rupture d'éprouvettes de bété testées dans la direction perpendiculaire au fil du bois*

### 3.3.4 Détermination expérimentale des coefficients de diffusion des contreplaqués

Plusieurs auteurs se sont intéressés à la détermination des coefficients de diffusion de l'eau liée $K_D$ dans le bois : Siau (1971), Perré (1996, 2010)., Mouchot (2000), Tremblay (2000), Nsouandélé (2009). Les valeurs trouvées dans la littérature sont fonction des essences et varient énormément. En ce qui concerne la valeur du coefficient d'échange surfacique Ks, il dépend

fortement des conditions de séchage et de convection influencées par la vitesse de l'air. Ce fort potentiel de variabilité de ces grandeurs a milité pour leur détermination expérimentale.

### 3.3.4.1 Protocole Expérimental

Une presse de type PRESS-XS, équipée d'un capteur de teneur en eau, sous une pression de 150 mbar et à une Température de 60°C a permis d'obtenir des CP à 3 plis de dimension 600 x 600x 6 mm avec une teneur en eau supérieure à 32%. Dix échantillons de dimensions 100 x 100 x 6 mm (Figure 3.15) sont découpés de ces CP et sont placés dans une étuve à humidité relative constante (HR 50%) et de température constante (T= 40°C). Dans ces conditions, la teneur en eau à l'équilibre hygroscopique est de 10%. Les faces latérales sont isolées en imbibant de la colle afin de permettre que la diffusion se fasse uniquement dans la direction radiale. Toutes les heures, ces échantillons sont retirés de l'étuve et pesés. La masse anhydre est obtenue en plaçant l'échantillon dans une étuve à température constante de 105°C. L'état anhydre est atteint lorsque la masse de l'échantillon se stabilise.

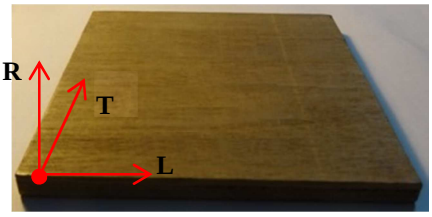



*Figure 3.15 : Exemple de spécimen.*

### 3.3.4.2 Résultats

Le tableau 3.3 présente les valeurs des coefficients de diffusion $K_D$ et d'échange $K_C$. La figure 3.16 illustre l'évolution de la teneur en eau de l'échantillon en fonction du temps à une température constante de 40° C. Elle présente un profil non linéaire, de type exponentiel. Ce résultat est en accord avec des auteurs comme Herritsch et al. (2007). Une procédure de calibrage manuel, consistant à minimiser la différence entre la courbe expérimentale et sa représentation analytique, a permis de caler définitivement l'expression de $K_D$ en fonction de la teneur en eau w. Dans le cas d'une évolution exponentielle, on peut écrire (équation 3.38)

$$K_D = K_0 e^{K_{0W} \cdot w} \qquad \textit{(eq 3.38)}$$

Où $K_0$ : coefficient de diffusion constante ($m^2/s$) ; $K_{0W}$ : constant de non linéarité ; W : teneur en eau.

*Tableau 3.3: Coefficients de diffusion et d'échange du contreplaqué*

| | |
|---|---|
| Coefficient of diffusion ($m^2/s$) | $K_D = 5.84\ 10^{-10}\ e^{1,97w}$ |
| Exchange coefficient (m/s) | $K_C = 2.34\ 10^{-8}$ |

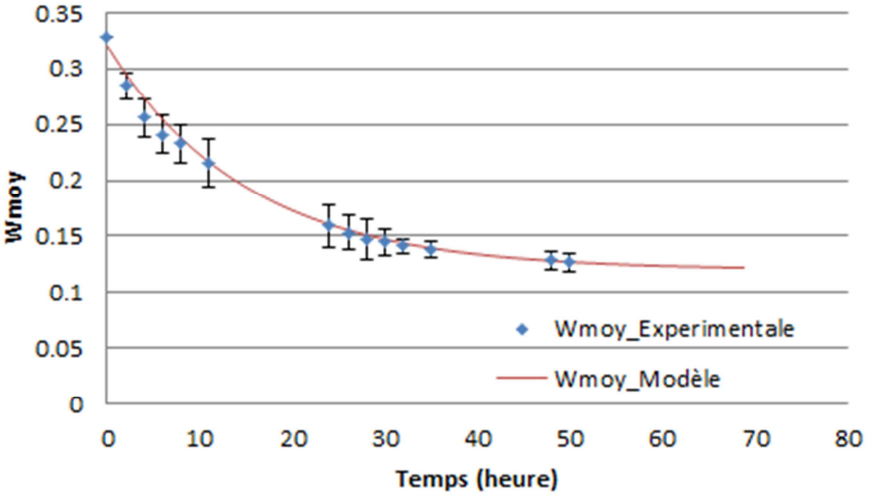



*Figure 3.16 : Évolution de la teneur en eau au cours du séchage du CP du Bété.*

## 3.4 Validation du modèle numérique

La validation du modèle numérique s'effectue en trois étapes. La première concerne l'étude de la sensibilité au maillage du CP. Dans la seconde, nous nous intéressons aux conditions aux limites du modèle et aux diverses données relatives au matériau. La dernière étape est de procéder expérimentalement, dans un premier temps, au séchage des éprouvettes de CP à configuration antisymétrique des plis afin d'obtenir des déplacements importants (donc facilement mesurables). Dans un second temps, ils sont comparées aux déplacements renseignés par le modèle numérique. Une fois le modèle validé, les déformations et les contraintes de la configuration conventionnelle du CP (faibles déplacements/déformations) seront déterminées en tout point pour une durée de séchage donnée.

### 3.4.1 Configuration et Maillage

Les contreplaqués à 3 plis étudiés dans ce chapitre sont élaborés en respectant les directions d'orthotropie de chaque pli comme l'indique la figure 3.17.

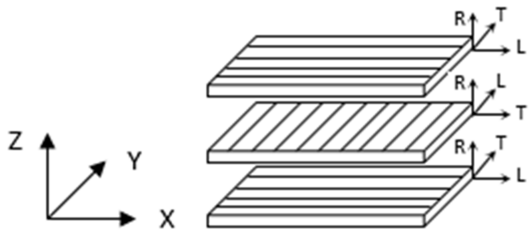



*Figure 3.17 : Orientation des plis suivant les directions orthotropiques*

Le calcul est effectué en trois dimensions et l'épaisseur du CP est choisie à l'échelle commerciale de 6mm en négligeant ici l'effet de l'adhésif. La figure 3.18 présente le maillage utilisé ainsi que les conditions aux limites et de chargement hydrique utilisés dans la simulation. Ces conditions de température et d'humidité relative permettent d'obtenir une teneur en eau finale au environ de 10%.

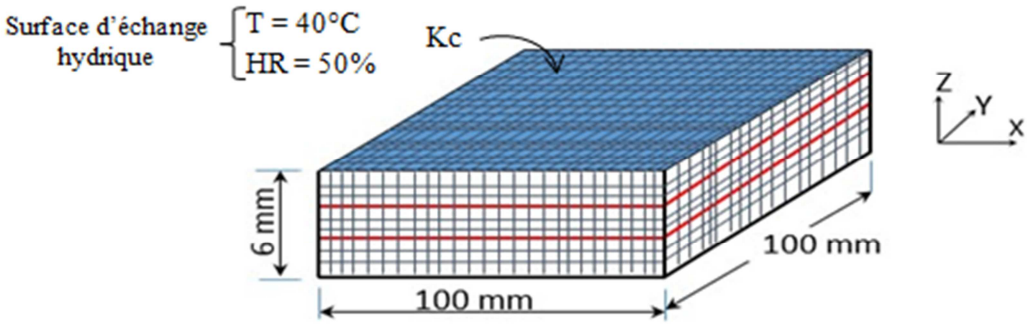



*Figure 3.18 : Chargement hydrique et maillage imposés dans le calcul*

Les extrémités des échantillons sont étanchéifiées pour éviter tout transfert d'humidité à travers les faces latérales. On considère ici le bois comme un matériau élastique orthotrope. On précise donc dans le code de calcul les directions d'orthotropie de chaque pli du CP.

L'interface est considérée parfaite. Le maillage est défini par des éléments cubiques à 8 nœuds, les zones à proximité des surfaces d'échanges ayant une densité de maillage plus élevée que le reste du matériau.

### 3.4.1.1 Étude de sensibilité au maillage suivant la direction radiale

Une étude de sensibilité au maillage a été effectuée afin d'optimiser le temps de calcul. A cet effet, une simulation de l'évolution de la teneur en eau du CP dont la variable est le nombre des nœuds (NBNO) suivant le profil radial du CP a été réalisé.

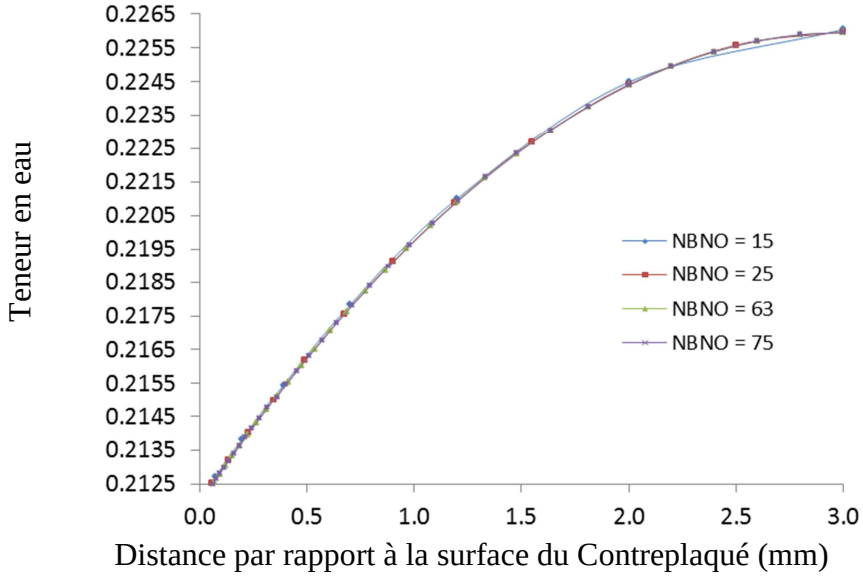



*Figure 3.19 : Test de sensibilité de la densité du maillage après 5h de séchage*

L'évolution de la teneur en eau du profil radial du contreplaqué après 5h de séchage a été comparée pour les différentes densités de maillage caractérisées par les différents NBNO suivant le profil radial du CP (figure 3.19). On constate qu'à partir de 25 nœuds, les courbes d'évolution sont quasi identiques. Ainsi, la densité de maillage retenue pour le calcul de transferts hydriques est celle faisant apparaître 25 nœuds suivant le profil radial.

### 3.4.1.2 Étude de sensibilité de l'ensemble du maillage

Suite au test de sensibilité de maillage sur la diffusion où seule la direction radiale a été prise en compte, un test de sensibilité de maillage relatif au calcul hydromécanique a été fait. La densité du maillage dans les autres directions a été calculée à l'aide de la variation de l'énergie élastique de déformation de l'ensemble de l'échantillon pour différents maillages (Figure 3.20).

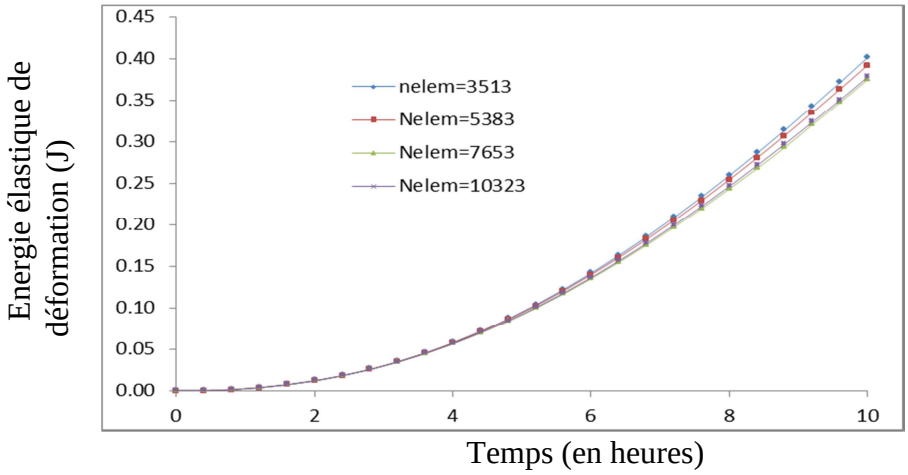



*Figure 3.20 : Test de sensibilité du pas de calcul (en seconde) du transfert hydrique*

Dans la figure ci-dessus, « Nelem » désigne le nombre total d'éléments pour un maillage donné. On constate alors qu'à partir de 7653 éléments, les courbes de l'énergie élastique de déformation en fonction de la densité de maillage sont pratiquement identiques.

### 3.4.1.3 Etude de sensibilité par rapport au pas de temps

Une étude de sensibilité au pas de temps de calcul a été effectuée. Le pas de temps est la discrétisation de la variable temps du processus de séchage. Un pas de temps plus petit permet une meilleure précision de calcul, mais rallonge la durée de calcul. La figure 3.21 représente l'évolution de la masse calculée en fonction du temps, pour les différentes valeurs suivantes : 3600s, 1080s, 720s, 180s et 90s.

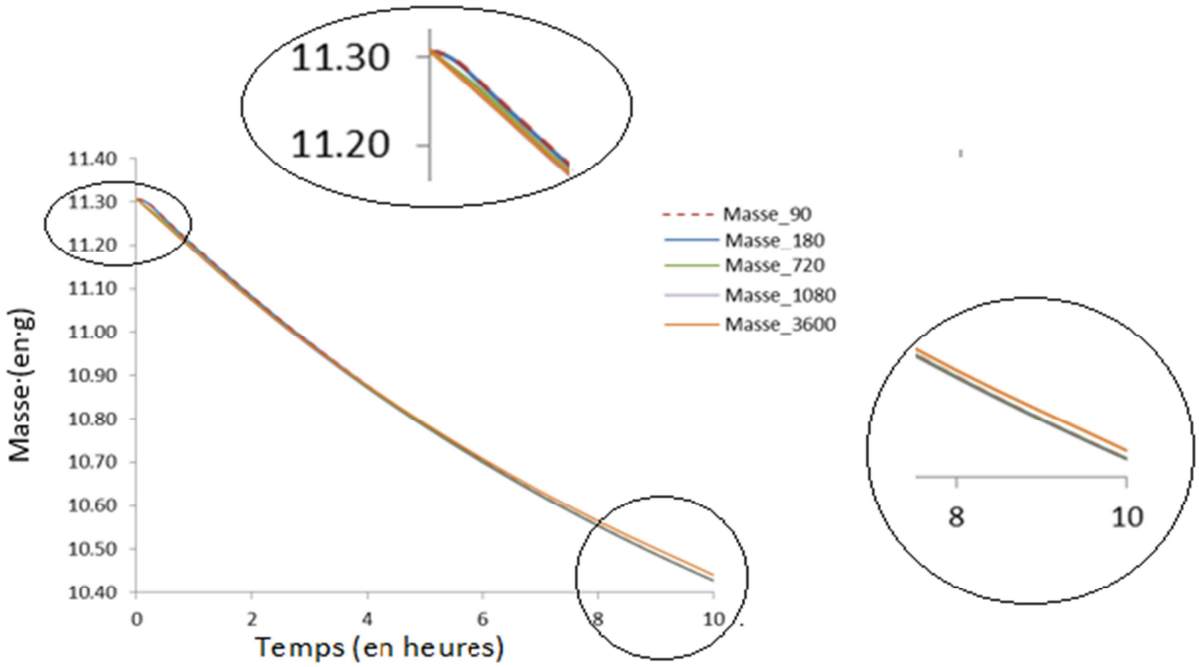



*Figure 3.21 : Test de sensibilité du pas de temps de calcul (en seconde) du transfert hydrique*

La figure 3.21 montre qu'au début du séchage, au-delà de 180s, on commence à noter une différence entre les courbes d'évolution. Au terme de 8 à 10 heures de séchage, la courbe issue du pas de temps de 720s est confondue à celles qui correspondent respectivement aux pas de 180 et 90s.

Le pas de temps de calcul choisi est de 720 secondes; il permet un calcul relativement rapide et l'écart des résultats en début de séchage avec un pas de 180 secondes est assez faible.

### 3.4.2 Conditions aux limites

Afin de permettre la libre déformation du CP sans générer des contraintes, les conditions aux limites sont appliquées en trois points (figure 3.22) comme suit : Uz = 0 au point A(14, 14, 0) et au point C (14, 88,0) et Ux = Uy = Uz = 0 au point H (88, 50, 0).

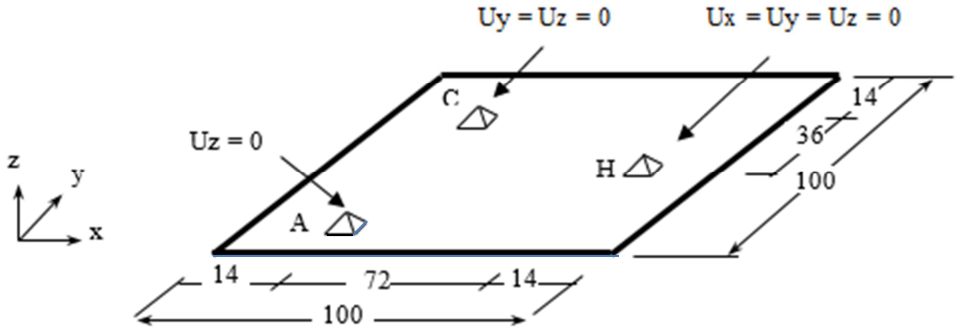



*Figure 3. 22 : Influence des conditions aux limites sur le gauchissement des plis*

### 3.4.3 Données du matériau

Les paramètres du matériau utilisés pour la simulation numérique sont listés dans le tableau 3.4. Ils sont représentatifs du pli de l'essence Bété.

*Tableau 3.4 : Paramètres du matériau (pli de bois) utilisés dans le cadre de la simulation du comportement au séchage des CP.*

| N° | Désignation | Paramètres suivant les directions orthotropiques | | | Observations |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Module d'élasticité (12%) | $E_L$= 14628 MPa<br>$G_{LT}$ = 517.4MPa<br>$\nu_{LT}$ = 0.46 | $E_T$ = 310 MPa<br>$G_{TR}$ = 997 MPa<br>$\nu_{TR}$ = 0.39 | $E_R$ = 1846 MPa<br>$G_{LR}$ = 3795 MPa<br>$\nu_{LR}$ = 0.39 | $E_L$ et $E_T$ sont obtenus expérimentalement et les autres suivant la revue de la littérature |
| 2 | Contrainte de rupture | $\sigma_{rL}$= 59 MPa | $\sigma_{rT}$= 4.05 MPa | | $\sigma_{rL}$ et $\sigma_{rT}$ obtenus expérimentalement |
| 3 | Coefficient de retrait | $\alpha_L$= 0.001 | $\alpha_T$ = 0. 246 | $\alpha_R$ = 0.164 | Données obtenues de la revue de la littérature |
| 4 | Masse volumique à 12% d'humidité | 660 kg/m$^3$ | | | Donnée obtenue de la revue de la littérature |
| 5 | Paramètres de la mécanosorption (MPa$^{-1}$) | $m_l = 0.1\ 10^{-3}$<br>$m_{lt} = 0.008$<br>$\mu_{lt} = 0$ | $m_t = 0.15$<br>$m_{rt} = 0.8$<br>$\mu_{rt} = 1$ | $m_r = 0.2$<br>$m_{lr} = 0.008\ 10^{-3}$<br>$\mu_{lr} = 0$ | Données obtenues de la revue de la littérature |
| | | $\bar{m} = \begin{bmatrix} m_l & -\mu_{tl}m_t & -\mu_{rl}m_r & 0 & 0 & 0 \\ -\mu_{lt}m_l & m_t & -\mu_{rt}m_r & 0 & 0 & 0 \\ -\mu_{lr}m_l & -\mu_{tr}m_t & m_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{tr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{lr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{lt} \end{bmatrix}$ | | | |
| 6 | Coefficient de diffusion ($K_D$) et d'échange ($K_C$) | $K_D = 5.84\ 10^{-10}\ e^{1,97w}$ (m$^2$/s)<br>$K_C$ = 2.34 10$^{-8}$ (m/s) | | | Obtenus expérimentalement |

| N° | Désignation | Paramètres suivant les directions orthotropiques | | | Observations |
|---|---|---|---|---|---|
| 7 | Paramètres de la viscosité obtenue par optimisation numérique | $\gamma_1^L$ ; $\gamma_2^L$ ; $\gamma_3^L$ $(\alpha_1^L)^{-1}$; $(\alpha_2^L)^{-1}$; $(\alpha_3^L)^{-1}$; | $\gamma_\mu^L = \gamma_\mu^T = \gamma_\mu^R$ $\alpha_\mu^L = \alpha_\mu^T = \alpha_\mu^R$ | $with\ \gamma_\mu^i = \frac{E_0^i}{E_\mu^i}\ and$ $\alpha_\mu^i = \frac{E_\mu^i}{\eta_\mu}\ (s^{-1})$ | A déterminer à partir du calibrage des courbes numériques et expérimentales |
| | | Avec $\mu \epsilon \{1,2,..,r\}$ : nombre de branches et $i\ \epsilon\{L,T,R\}$ : direction du bois. | | | |

En résumé, 7 séries de paramètres ont été utilisés dans le cadre de nos simulations. Certains sont déterminés expérimentalement et d'autres renseignés par la littérature.

1- Les valeurs des modules élastiques ($E_L$ et $E_T$) sont obtenues expérimentalement à travers des tests de traction menés sur 10 échantillons. L'influence de la teneur en eau W (%) sur les propriétés élastiques du bois est prise en compte par la correction linéaire (équation 3.39):

$$S_{11}^{-1}(W) = S_{11}^{-1}(12\%)\left[1 - C_{Hij}(W - 12)\right] \quad (eq3.\ 39)$$

où les $C_{Hij}$ sont des coefficients ( Kollman, 1968 ; Palka, 1973 ; Gerhards, 1982 et Guitard, 1987).

2- Les contraintes moyennes ultimes en traction des plis déterminées expérimentalement sont respectivement de 59 MPa et 4,05 MPa dans les directions longitudinale et transversale des fibres.

3- Les coefficients de retrait sont supposés constants au cours du séchage. Les valeurs initiales sont choisies à partir de la base de données Tropix 7 (2014) et les valeurs finales retenues sont obtenues par rapprochement des courbes expérimentale et numérique de déplacement de l'échantillon (CP).

4- La densité volumique du Bété varie linéairement ave la teneur en eau. Pour une teneur en eau w(%), la densité peut être déduite comme suit :

$$\rho_{(w)} = \rho_{(w=0\ \%)}(1 + w/100) \quad (eq3.\ 40)$$

5- Les paramètres de la mécano-sorption sont supposés constants et indépendants de la teneur en eau. Les valeurs sont issues des résultats présentés par Santaoja et al. (1991) et Martensson (1992).

6- Nous supposons que les paramètres de la viscosité du modèle de Maxwell à trois branches sont identiques dans toutes les directions et sont obtenus par rapprochement des courbes expérimentale et numérique de l'évolution de déplacement du point P1 du Contreplaqué (Figure 3.23).

## 3.4.4 Résultats

Cette partie présente les résultats obtenus dans la configuration antisymétrique et ceux de la configuration conventionnelle des CP.

### 3.4.4.1 Détermination de la configuration de validation du modèle

Partant de la variation de différentes dispositions des plis du CP, celle qui permet d'observer des grands déplacements est celle qui a la disposition antisymétrique dont les directions des fibres (direction longitudinale) sont inclinées comme l'indique la figure 3.23. A l'angle d'inclinaison de 15°, les déplacements sont considérables pour permettre la comparaison des résultats numériques aux résultats expérimentaux.

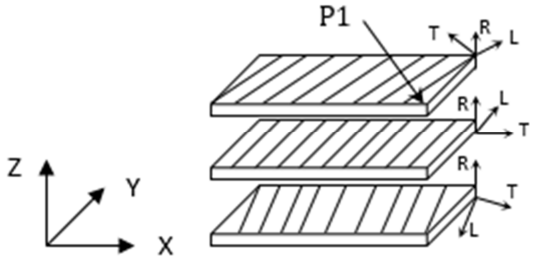



*Figure 3.23 : Configuration antisymétrique de l'échantillon du CP.*

### 3.4.4.2 Résultats issus de la configuration antisymétrique du CP

#### a- Résultat expérimental de déplacement

A partir de cette configuration, nous avons déterminé expérimentalement le champ de déplacement du CP à l'aide de 5 échantillons de CP de bété collés verts avec une teneur en eau moyenne de 32%. Ils sont placés dans une étuve de séchage respectant les conditions aux limites de diffusion (utilisées pour la détermination du coefficient de diffusion) et les conditions aux limites mécaniques de la figure 3.22 à la différence que les conditions aux limites sont toutes des appuis simples. Les résultats obtenus dans ces conditions aux limites présentent des CP ayant subis des déformations considérables et facilement mesurables comme l'indique la figure 3.24a.

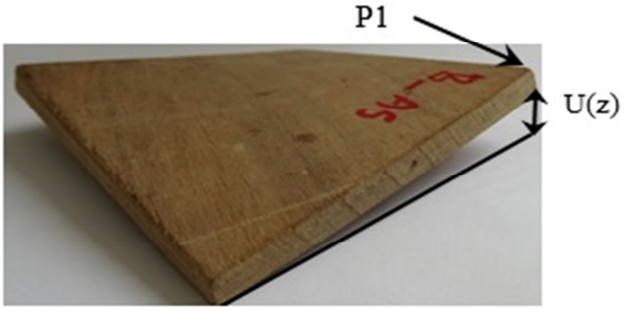



Figure 3.24a : Déformation du contreplaqué

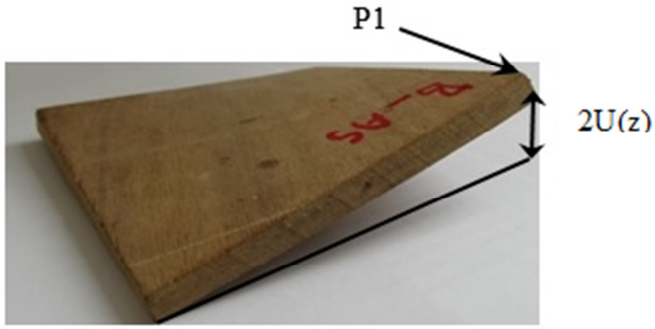



Figure 3.24b : disposition du CP pour mesure de P1

*Figure 3.24 : Champ de déplacement du CP obtenu expérimentalement après 50 heures de séchage*

Les déplacements U(z) du point P1 des CP (figure 3.24a) de chacune des cinq échantillons sont mesurés à chaque heure et à l'aide d'un pied à Coulisse numérique selon la disposition de la figure 3.24b dont la valeur est pratiquement le double de celle recherchée. Le tableau 3.5 ci-dessous donne le récapitulatif des mesures des différents échantillons (E1, E2, E3, E4, E5) :

*Tableau 3.5 : Résultats expérimentaux de déplacement au point P1 des échantillons au cours du séchage.*

| | | **Déplacement du P1 (mm) des Échantillons** | | | | | **Valeur moyenne de déplacement de P1** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **E1** | **E2** | **E3** | **E4** | **E5** | |
| Temps (H) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 4 | 3.8 | 4 | 4.1 | 4.1 | 4 |
| | 4 | 4.9 | 4.8 | 5 | 5.3 | 5.1 | 5.02 |
| | 6 | 5.5 | 5.8 | 5.8 | 5.9 | 6 | 5.8 |
| | 8 | 6 | 6.3 | 6.3 | 6.4 | 6.5 | 6.3 |
| | 11 | 6.4 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7 | 6.8 |
| | 24 | 7.5 | 7.8 | 7.9 | 8 | 8 | 7.84 |
| | 26 | 7.7 | 7.9 | 8 | 8.1 | 8.1 | 7.96 |
| | 28 | 7.8 | 8 | 8.2 | 8.3 | 8.2 | 8.1 |
| | 30 | 8.0 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.3 | 8.18 |
| | 32 | 8.15 | 8.2 | 8.25 | 8.3 | 8.35 | 8.25 |
| | 35 | 8.2 | 8.25 | 8.35 | 8.35 | 8.4 | 8.31 |
| | 48 | 8.4 | 8.4 | 8.55 | 8.55 | 8.6 | 8.5 |
| | 50 | 8.4 | 8.4 | 8.55 | 8.55 | 8.6 | 8.5 |

L'évolution de déplacement moyen du point P1 est représentée dans la figure 3.25 ci-dessous.

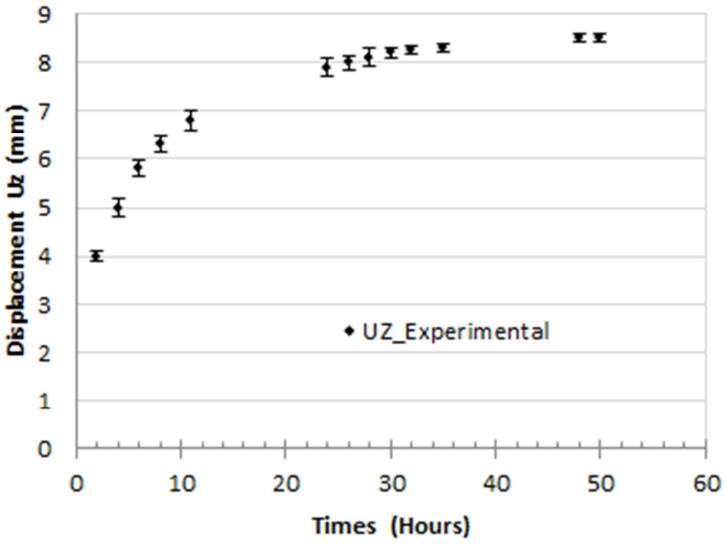



*Figure 3.25 : Évolution de déplacement Expérimental du point P1 du CP au cours du séchage*

Le champ de déplacements du CP après 50 heures de séchage est illustré par la figure 3.25.

### b- Validation du modèle numérique

Pour caler les courbes numériques aux courbes expérimentales, la simulation numérique, dans un premier temps (Scénario 1) a été faite sans tenir compte du caractère/comportement viscoélastique des plis.

**Scénario 1 : le comportement viscoélastique des plis de bois n'est pas pris en compte**

Le modèle rhéologique correspondant du pli de ce scénario est donné par la figure 3.26 comme suit :

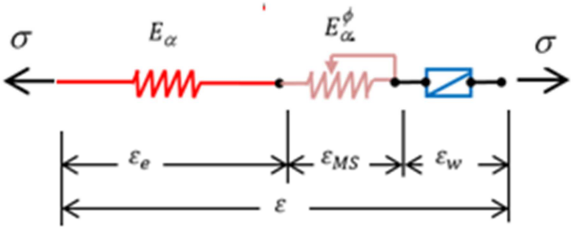



*Figure 3.26 : Modèle rhéologique à une dimension du scénario 1*

Dans ce scénario, plusieurs simulations du modèle ont été exécutées en faisant varier les paramètres du matériau à savoir les modules d'élasticité, la densité volumique, les coefficients de retrait. Après différentes itérations du modèle pour chaque propriété suscitée, il apparait que le coefficient de retrait tangentiel influence considérablement les déplacements de l'échantillon du CP. En effet, le calibrage de coefficient de retrait tangentiel ($\alpha_T$), partant de la donnée obtenue dans la littérature du bois bété (CIRAD, 2012) a permis d'obtenir les résultats présentés dans la figure 3.27 pour quatre cas de valeurs retenues ($\alpha 1$ = 0,246 ; $\alpha 2$ = 0.492 ; $\alpha 3$ = 0,634 ; $\alpha 4$ = 0.780)

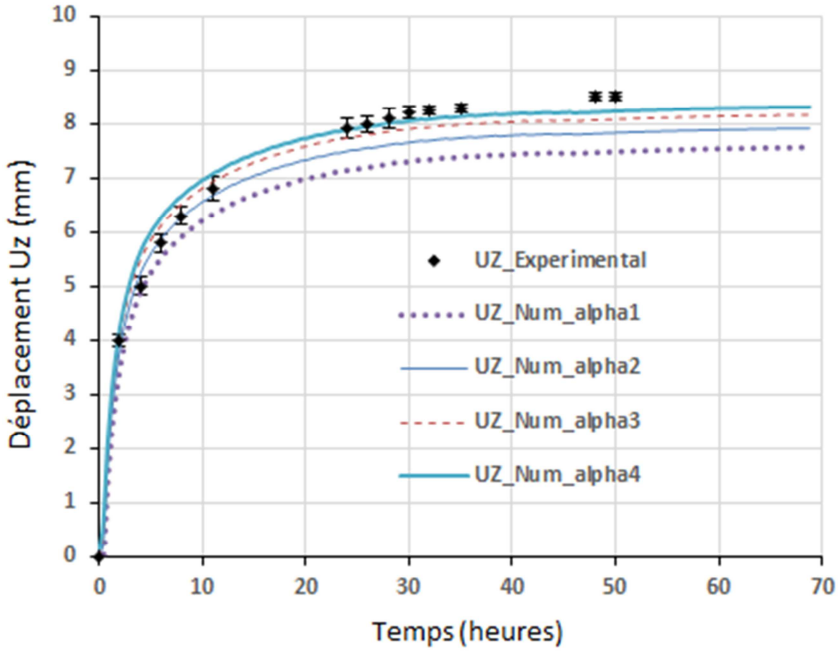



*Figure 3.27 : Évolution de déplacement du point P1 du CP en fonction de la variation du retrait tangentiel, sans la considération de comportement viscoélastique*

Pendant les cinq premières heures de séchage, le déplacement en fonction du temps est pratiquement linéaire et dans cette plage, tous les coefficients de retrait tangentiel utilisés prédisent bien le comportement élastique au séchage du contreplaqué. La vraisemblance de scénario est limitée par sa capacité à prédire les déplacements dans la phase post-élastique.

La valeur du coefficient de retrait tangentiel du pli est retenue en minimisant le critère quadratique entre les résultats expérimentaux et numériques des trente premières heures en supposant qu'à cet instant l'effet viscoélastique est négligeable. Cette valeur du scénario (alpha 3 = 0,634) s'écarte considérablement de celle du bois massif. Cela peut se justifier par la présence des fissures issues de l'opération du déroulage. Elle est donc choisie pour la suite du modèle numérique.

**Scénario 2 : prise en compte du comportement viscoélastique des plis de bois.**

Dans le cadre de la prise en compte des déformations viscoélastiques, le modèle rhéologique global du pli unidirectionnel i où i ∈ $\{L, T, R\}$ est illustré par la figure 3.28.

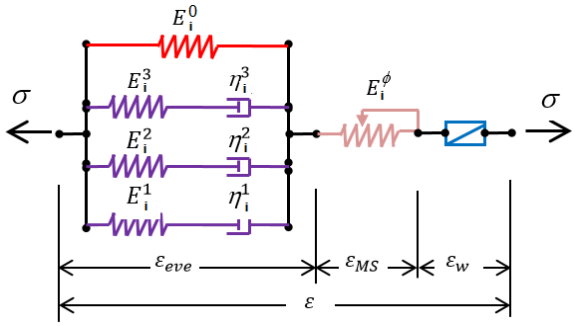



*Figure 3.28 : Modèle rhéologique à une dimension du scénario 2*

Au terme du calibrage des paramètres viscoélastiques $\gamma_i^\mu$ et $\left(\alpha_i^\mu\right)^{-1}$(Equation 3.41) relatifs aux amortisseurs des branches de Maxwell avec μ le numéro d'une branche et i la direction orthotropique du matériau bois, les cas d'études manuelles retenus sont présentés dans le tableau 3.6 et illustrés par la figure 3.29.

$$Avec\ \gamma_i^\mu = \frac{E_i^0}{E_i^\mu}\ et\ \alpha_i^\mu = \frac{E_i^\mu}{\eta_i^\mu}\ (en\ s^{-1}) \qquad \text{(Eq3. 41)}$$

*Tableau 3.6 : Calibrage des paramètres viscoélastique des plis*

| Cas d'étude | $\gamma_i^1$ | $\gamma_i^2$ | $\gamma_i^3$ | $\alpha_i^\mu$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,01 | 0,015 | 0,005 | $(\alpha_1^l)^{-1}$= 0,5h ; $(\alpha_2^l)^{-1}$= 2h ; $(\alpha_3^l)^{-1}$= 10h |
| 2 | 0,05 | 0,075 | 0,025 | |
| 3 | 0,1 | 0,15 | 0,05 | |

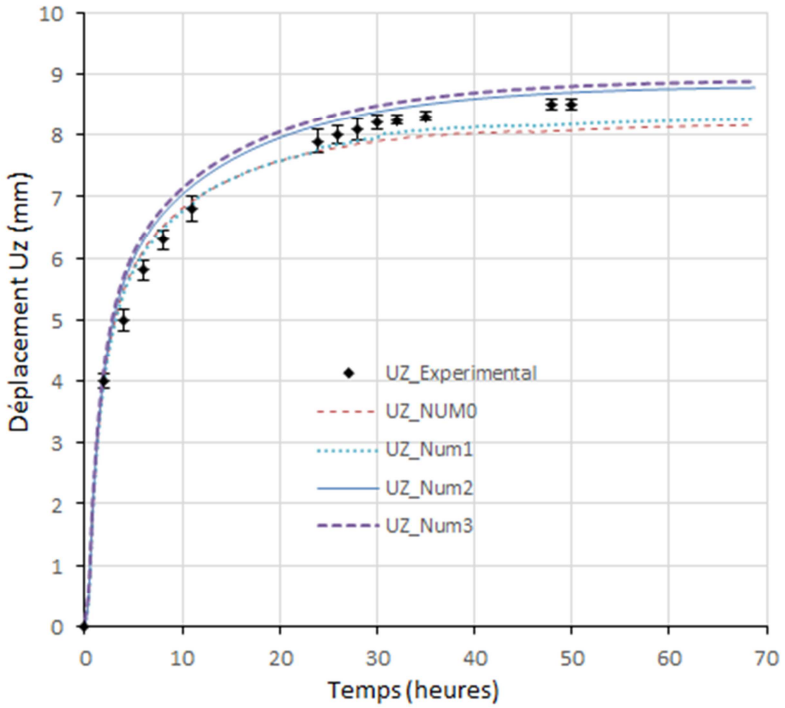



*Figure 3.29 : Évolution de déplacement du point P1 du CP*

La courbe UZ_NUM0 est celle qui donne l'évolution du déplacement du point P1 sans tenir compte de l'effet viscoélastique du bois. Les courbes UZ_NUM1, UZ_NUM2 et UZ_NUM3 sont respectivement les courbes correspondantes aux études des cas 1, 2 et 3 (tableau 3.6).

### c- Déplacements et contraintes estimés à partir du modèle numérique

Les paramètres de modèle viscoélastique choisis pour la suite de l'étude sont ceux correspondant à la courbe UZ_Num2 obtenue en minimisant le critère quadratique entre les résultats expérimentaux à ceux obtenus numériquement. Le champ de déplacement numérique après cinquante heures de séchage est présenté par la figure 3.30.

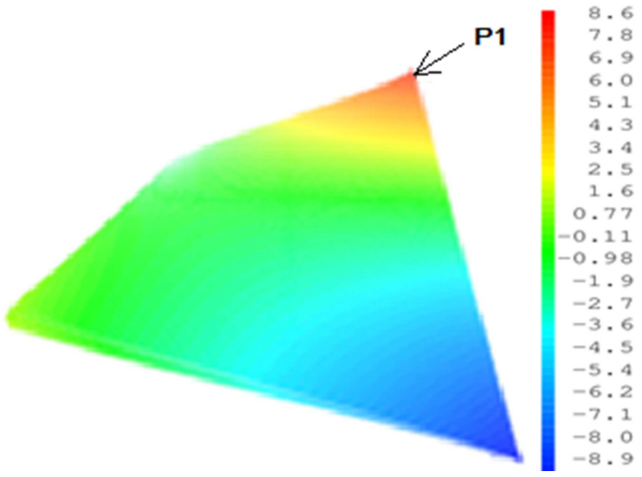
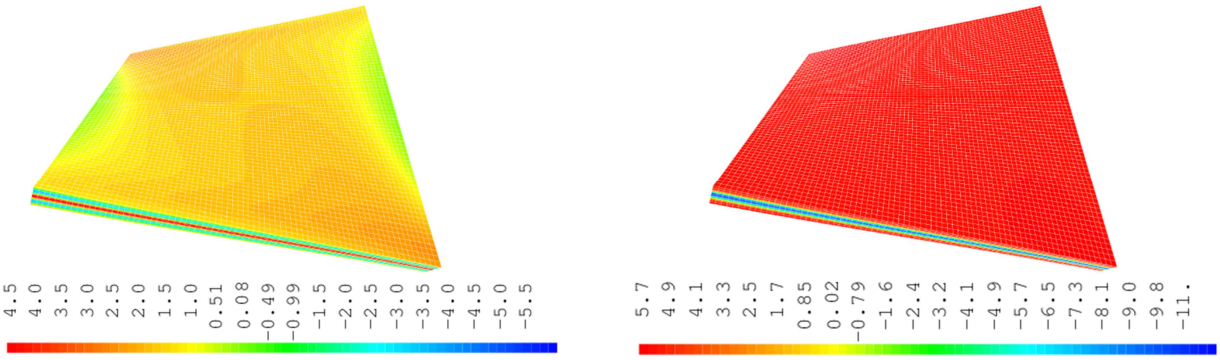



*Figure 3.30 : Champ de déplacement du CP (mm) obtenu numériquement après 50 heures de séchage*

Le champ de contraintes du CP suivant les directions X et Y après 50 heures de séchage est présenté par la figure 3.31; :




Contraintes dans la direction X (MPa) Contrainte dans la direction Y (MPa)

*Figure 3.31 : Champ de contraintes obtenu numériquement des CP à configuration asymétrique après 50 heures de séchage*

Le modèle ainsi validé par cette configuration du CP permettra par la suite de déterminer les déformations et les contraintes dans la configuration conventionnelle (figure 3.17).

### 3.4.4.3 Résultats issus de la configuration conventionnelle du CP

De façon générale, la stabilité dimensionnelle des contreplaqués est effective quand les plis sont disposés alternativement de façon orthogonale (figure 3.17).

#### a- Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux obtenus à partir de cette configuration après 50 heures de séchage présentent des fissures sur les deux faces externes le long des directions des fibres (figure 3. 32). Ceci sera analysé avec les résultats numériques.

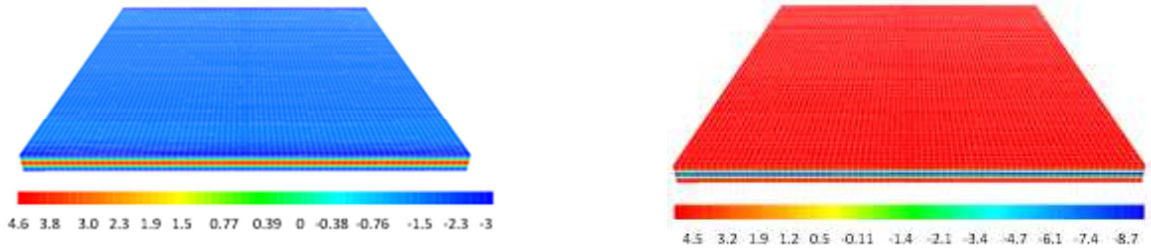
Face 1 Face2

*Figure 3.32 : État du CP après 50 heures de séchage*

#### b- Résultats numériques

Les résultats des champs de contraintes obtenus numériquement suivant cette même configuration sont présentés par la figure 3.33 et montrent que :

- suivant la direction X (i.e. direction longitudinale des plis extérieurs), la contrainte maximale en surface du CP est en compression et de l'ordre de -3 MPa et celle à l'intérieur du CP est en traction et d'une valeur de 4,6 MPa.
- suivant la direction Y (i.e. direction tangentielle des plis extérieurs), la contrainte maximale en surface du CP est en traction et d'une valeur de 4,75 MPa et celle à l'intérieur du CP est en compression et d'une valeur de -8,7 MPa.




a- Contrainte globale suivant la direction X (MPa)

b- Contrainte globale suivant la direction Y (MPa)

*Figure 3.33 : Evaluation numérique du champ de contraintes après 50 heures de séchage*

L'évolution de la contrainte d'un point surfacique du CP montre que les contraintes en chaque point de la surface du CP atteignent leur valeur maximale au terme des cinq premières heures de séchage, indépendamment de la prise en compte ou non du comportement viscoélastique des plis. Ce résultat est illustré par les courbes SigX_1, SigY_1, SigX_2 et SigY_2 de la figure 3.34.

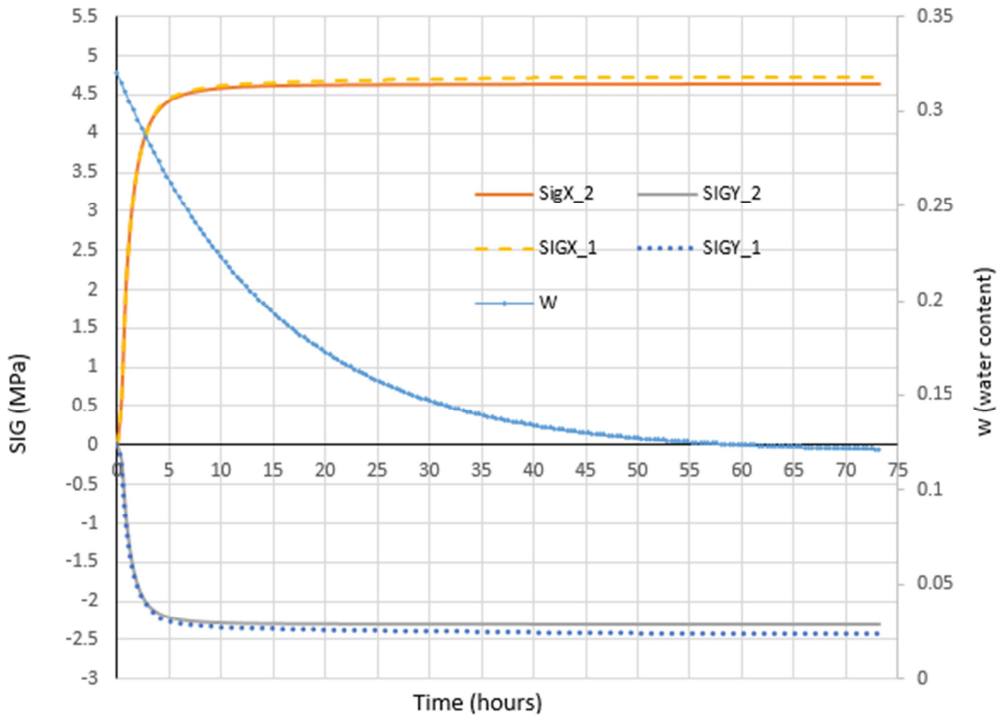



*Figure 3.34 Évolution des contraintes dans les directions X et Y d'un point surfacique du CP.*

## 3.5 Discussion

### 3.5.1 Comparaison entre les modèles rhéologiques et les résultats expérimentaux

De façon générale, les résultats obtenus numériquement comparés à ceux obtenus expérimentalement sont proches. Nous avons noté qu'en ce qui concerne les paramètres des propriétés élastiques, seul le retrait tangentiel a une influence considérable lors du calage du modèle numérique au modèle expérimental par rapport aux autres paramètres tels que le module d'élasticité, le retrait radial et longitudinal. Ceci s'explique par la présence des microfissures créées lors du déroulage donnant ainsi aux plis la possibilité d'être comprimés le plus possible.

### 3.5.2 Justification de l'apparition des fissurations

Dans la configuration antisymétrique, ayant permis de valider le modèle numérique grâce aux déplacements obtenus expérimentalement, nous constatons, à l'œil nu, l'absence des fissures (Figure 3.24). La contrainte tangentielle maximale obtenue à partir des composantes suivant les directions x et y du contreplaqué est égale à environ 3.89 MPa, obtenu par la relation de l'équation 3.42 suivante :

$$\sigma_T = \sigma_X \, Cos\, 15° + \sigma_y \, Sin\, 15°. \qquad \text{(Eq3. 42)}$$

La valeur de la contrainte tangentielle maximale est inférieure à celle de la contrainte de rupture moyenne obtenue expérimentalement (4.05 MPa); ceci pourrait expliquer pourquoi nous n'observons pas de fissures sur le CP (figure 3.24).

En revanche dans la figuration conventionnelle où les plis sont disposés orthogonalement, les résultats numériques montrent que les contraintes tangentielles aux fibres des plis surfaciques obtenues sont supérieures à 4.7 MPa. Ce qui est supérieure à la contrainte moyenne de rupture minimale déterminée expérimentalement (4,05MPa). (Figure 3. 32)

### 3.5.3 La cinétique du séchage

A partir de l'évolution des contraintes en fonction du temps de séchage de la figure 3.34, on note que dès les cinq premières heures du séchage on atteint pratiquement le seuil de la contrainte maximale. Autrement dit, entre la variation de la teneur en eau de 32% à 25% les contraintes dans le CP atteignent pratiquement leur maximum. Ce qui permet de comprendre que si l'on veut réduire les contraintes au cours du séchage, il faudrait prendre les mesures dès le début du séchage.

# Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué une simulation numérique du séchage du contreplaqué réalisé à partir des plis de bété collés à l'état vert afin de prédire les contraintes et les déformations. La démarche a consisté en l'étude de deux configurations de CP. La première disposée asymétriquement à 15° a permis de valider le modèle numérique à partir des résultats expérimentaux présentant des déformations considérables. Le modèle validé est ensuite appliqué dans la deuxième configuration disposée perpendiculairement afin de déterminer les contraintes et déformations au cours de leur séchage.

Le fonctionnement numérique des modèles a nécessité au préalable l'identification de nombreux paramètres de façon directe (expérimentation) tels que le MOE, MOR et PSF et de façon indirecte à travers la revue de la littérature la rétractibilité des plis, etc... Les résultats obtenus sont en accord avec la littérature et cohérents avec le process de déroulage des plis initialement déterminé.

Deux modèles rhéologiques ont été étudiés ; le deuxième semble plus proche des résultats expérimentaux que le premier. La modélisation étudiée présente de nombreux atouts : expliquer la fissuration des CP et d'identifier la cinétique de séchage des CP, intégrer le niveau de défauts des plis dans la prévision des contraintes de rupture et des déformations des CP, qui permet de préserver leur qualité technologique.

Dans le chapitre suivant, il sera question de proposer des solutions au niveau du procédé de fabrication pour améliorer la qualité du CP, en particulier réduire les fissures observés précédemment.

# CHAPITRE 4 : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DU SÉCHAGE SOUS VIDE DES CONTREPLAQUÉS

Introduction ..... 109

4.1 Mécanisme du séchage sous vide ..... 109

4.2 Présentation du séchoir sous vide ..... 110

4.3 Choix et caractéristiques des échantillons ..... 111

4.4 Séchage des CP sous vide continu sans cycle de séchage/humidification ..... 114

4.5 Résultats ..... 114

4.6 Discussion ..... 116

4.7 Séchage sous vide continu des contreplaqués avec application d'un cycle de séchage/réhumidification ..... 117

4.8 Caractérisation mécanique des panneaux ..... 121

Conclusion ..... 121

# INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons élaboré une modélisation du comportement au séchage du contreplaqué collé à l'état vert. Les résultats expérimentaux et numériques ont montré que les fissures observées sur les contreplaqués séchés sous pression atmosphérique sont dues aux contraintes internes qui sont supérieures à la contrainte de rupture du bois dans le sens transversal. De plus, au terme des cinq premières heures, on atteint pratiquement le seuil maximal de contrainte alors que la teneur en eau reste au-dessus de 20% . Ces fissures peuvent être tolérées dans le secteur de l'industrie navale étant donné que les CP sont enduits d'une couche de résine et de fibres de verre dans la suite du procédé (Lavalette, 2003). Le secteur de la construction présente cependant des exigences beaucoup plus strictes du point de vue de l'intégrité matérielle du contreplaqué. C'est la raison pour laquelle nous nous proposons dans ce chapitre d'identifier un procédé qui permet d'améliorer considérablement l'intégrité matérielle des contreplaqués au cours du séchage. La stratégie envisagée consistera à relaxer les contraintes identifiées par le modèle en intégrant un cycle de séchage et d'humidification pour relaxer celles-ci. Nous avons choisi d'utiliser le séchage sous vide par membrane puisqu'il a le double intérêt de sécher et de maintenir une pression sur les plis encollés.

## 4.1 Mécanisme du séchage sous vide

Les séchoirs sous vide sont des séchoirs artificiels dont le facteur déterminant est la dépression. L'action du vide se traduit par un abaissement de la température d'ébullition de l'eau. Lorsque la pression totale est inférieure à la pression atmosphérique, la température d'ébullition de l'eau devient d'autant plus faible que cette pression diminue, ce qui accélère le séchage (Annexe 4.1). Cette figure montre également la ligne de coexistence entre l'eau liquide et sa vapeur. Dans cette condition, l'eau circule cinq fois plus vite que dans le matériau bois à pression atmosphérique (Aléon et al., 1991). La pression de vapeur saturante ($P_{VS}$) est la pression à laquelle la vapeur d'eau est en équilibre avec sa phase liquide. Elle correspond au point d'ébullition de l'eau, et dépend exclusivement de la température, selon le modèle de Rankine (eq 4.1). Ce modèle est valable pour une gamme de température de 5°C à 140°C, avec $P_{VS}$ en atm. et T en Kelvin.

$$\ln(P_{vs}) = 13{,}7 - \frac{5120}{T} \qquad \textit{(eq 4.1)}$$

Le bois peut être en contact permanent avec des éléments chauds tels que les plaques en aluminium dans lesquelles circule de l'eau chaude ou de la vapeur surchauffée via des ventilateurs.

Lorsque la dépression qui crée le vide est maintenue jusqu'à la fin du séchage, on parle de séchage sous vide continu et il est dit discontinu lorsque qu'on interrompt les phases de vide par des intervalles réguliers et en réchauffant le bois à pression atmosphérique.

L'intérêt du séchage sous vide réside sur (CTBA, 2007) :

- la possibilité de sécher, dans de bonnes conditions, des essences feuillues de forte épaisseur.
- une mise en œuvre facile car elle donne une facilité dans le raccordement avec possibilité d'un dispositif monobloc ;
- la capacité de pouvoir sécher des bois de toutes épaisseurs en obtenant facilement une faible humidité finale ;
- la rapidité : la durée de séchage est 4 à 5.5 fois plus courte que celle d'un séchage par air chaud climatisé et les déformations sont très sensiblement plus faibles (Aléon et al., 1990, 1991) ;

Dans le cadre de nos travaux, nous avons utilisé le séchoir sous vide continu avec possibilité de créer des cycles de séchage et d'humidification en abaissant la température.

## 4.2 Présentation du séchoir sous vide

Le séchoir sous vide à presse type PRESS-XS utilisé dans le cadre de nos expérimentations est composé essentiellement (Figure 4.1) :

- de la cellule de séchage étanche, faite d'une cuve parallélépipédique dotée d'un couvercle composé d'une toile élastique lui permettant de se déformer ;
- d'un système de chauffage formé par un ensemble de trois plaques chauffantes à résistance électrique d'une puissance de 12 kW ;
- d'une pompe à vide de type anneau liquide fonctionnant avec de l'eau ;
- d'une boite de commande électrique de contrôle du séchage pour la régulation ;

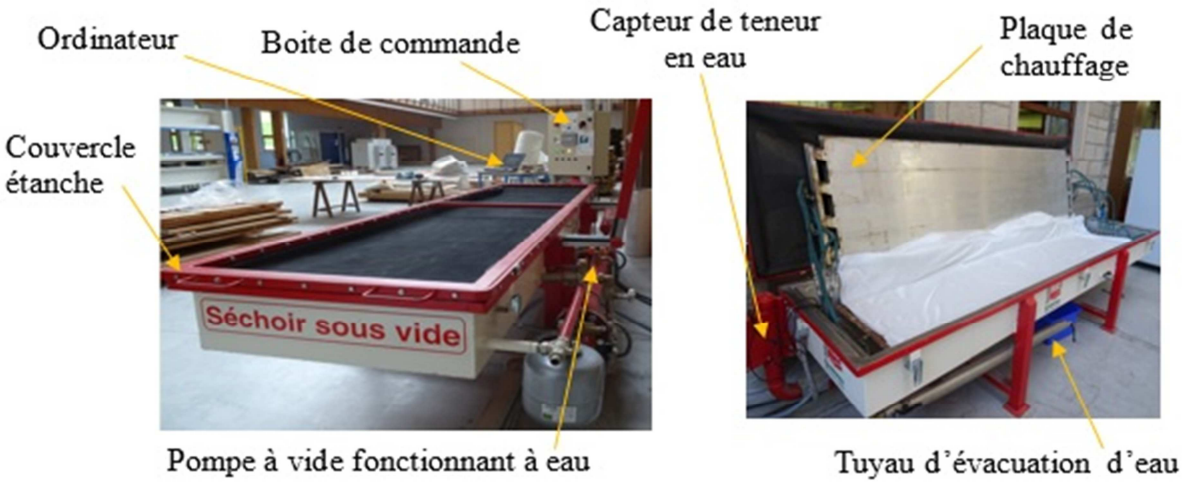



*Figure 4.1 Vues extérieure et intérieure du Séchoir sous vide*

## 4.3 Choix et caractéristiques des échantillons

Le choix des essences destinées aux études expérimentales est issu des conclusions du chapitre 2 sur l'étude multicritère des essences pour la fabrication du CP selon le milieu d'utilisation. C'est le cas du choix de l'essence Bete pour la classe d'utilisation 3 et le lotofa pour la simple raison que cette dernière est déjà exploité pour la fabrication des CP. Par contre pour la classe d'usage 2, le choix a été porté sur le Dabema au lieu du Bomanga parce qu'il a une très forte pente de fil. En effet, il nous est important de mettre en évidence la capacité de sécher et de stabiliser après collage de bois complexes, car aujourd'hui, ils ne peuvent être mis en œuvre. En ce qui concerne la classe d'usage 1, l'Aningré répond le mieux au critère de choix. Nous avons ajouté le fromager puisque ses plis déroulés ont une très grande souplesse, et l'ilomba qui est aussi une essence déjà exploitée pour la fabrication du CP.

Les échantillons utilisés au cours des différentes expérimentations sont obtenus à partir des billons provenant des forêts du Bassin du Congo et précisément des Unités d'Aménagement Forestière 10054 et 10056. L'ilomba, le lotofa, le fromager, le bété, le dabema et l'aningré ont fait l'objet d'un prélèvement en forêt pour être les supports de nos expérimentations. Arrivés au laboratoire, seules les quatre dernières ont pu être acheminées au Campus ENSAM de Cluny dans des conditions adéquates pour la fabrication des contreplaqués (Figure 4.2)

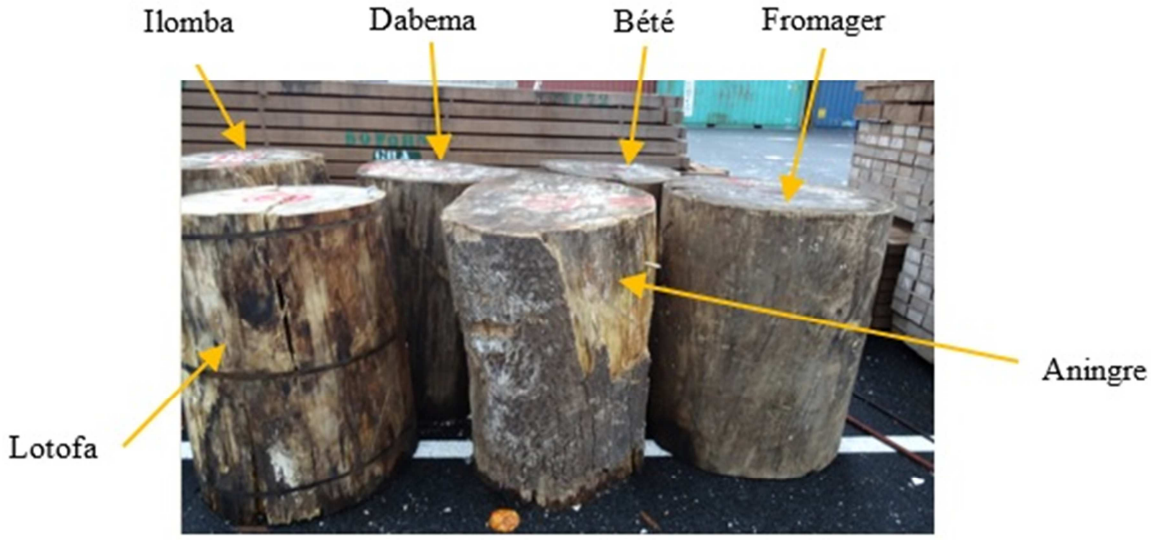



*Figure 4 2 : Billons des différentes essences*

Ces billons ont été équarris et étuvés pendant 24h à 60°C (Figure 4.3 ). Seul le Fromager a été déroulé sans étuvage s'agissant d'une essence très tendre.

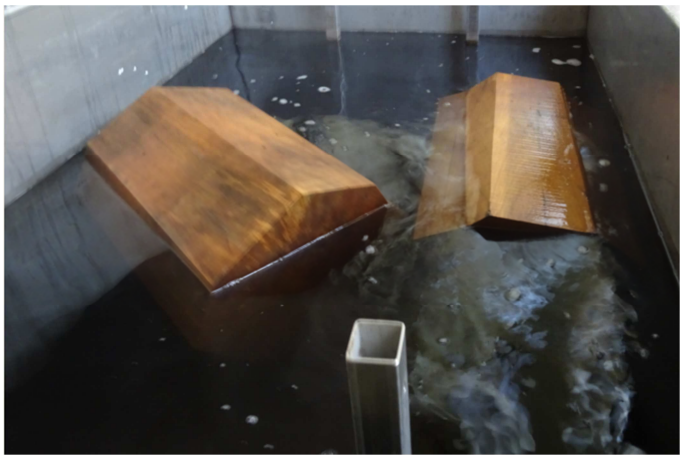


*Figure 4.3: Etuvage des billons.*

Les billons équarris sont ensuite transformés sur la ligne de déroulage Equipex du LaBoMAP (Figure 4.4 ) pour produire des plis de dimensions 600 x 600 $mm^2$ ( surface) et d'épaisseur 2mm. La vitesse de coupe a été fixée à 1m/s soit 60m/min ; ce qui est un peu faible pour les industriels, mais assure des conditions de coupe très favorables tout en minimisant les risques de blocage des placages au niveau du massicot. L'angle de dépouille, paramètre essentiel du déroulage a été réglé de manière suivante : 1,5° au-delà de 200 mm de rayon, variation linéaire jusqu'à 1° jusqu'au rayon final (35mm).

La pression exercée par la barre de pression (angulaire) est pilotée par deux côtes horizontales et verticales. On l'exprime souvent en pourcentage. Elle signifie que le passage laissé

pour le placage est plus réduit que l'épaisseur déroulée. Le choix qui a été retenu est d'utiliser 8% de pression afin de limiter la fissuration sans endommager l'état de surface, sans engendrer des variations d'épaisseur, tout en limitant les efforts de coupe. Les plis de 60 $cm^2$ ainsi obtenus ont été numérotés, empaquetés dans des films polyanes pour éviter qu'ils sèchent et stockés dans une enceinte réfrigérée à 4°C afin de maintenir leur taux d'humidité au-dessus du point de saturation des fibres.

*Figure 4.4: Déroulage des billons.*

Le contreplaqué étant constitué d'un assemblage de plis de bois, (Simon et al., 2001), les propriétés en cisaillement figurent parmi les plus représentatives de la qualité du collage. Généralement, un collage performant est obtenu lorsque la rupture, à l'issue d'une sollicitation du joint de colle, a lieu dans le bois. Sur la base des travaux de Lavalette (2013), le grammage choisi pour l'expérimentation est de 300 $g/m^2$. Il respecte les conditions de cisaillement des joints de colle déterminées selon la norme NF EN 314 (1993).

La quantité exacte d'adhésif polyuréthane (Collano RP2554) est pesée avant chaque collage afin de garantir le grammage appliqué (300 $g/m^2$). L'adhésif est appliqué sur les plis de bois par simple encollage, à l'aide d'une raclette crantée afin que la colle soit répartie uniformément (Figure 4.5). Les plis sont ensuite disposés en alternant à 0/90° le sens du fil du bois pour former un contreplaqué équilibré.

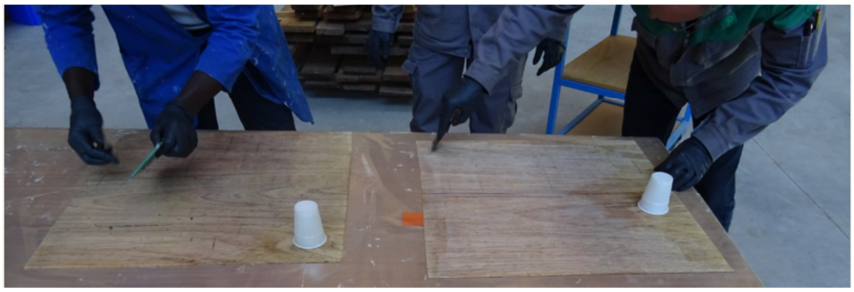


*Figure 4.5: Préparation des contreplaqués : encollage des plis*

## 4.4 Séchage des CP sous vide continu sans cycle de séchage/humidification

Les essences de référence pour cette expérience sont le Hêtre et le Dabéma en raison de leur présence en abondance au laboratoire. Les plis collés à l'état vert sont placés dans l'étuve en couches alternées avec des plaques chauffantes et sont comprimés entre la paroi inférieure de la cellule (une surface plate et rigide) et la toile élastique par une pression de 150 mbar. Les CP et les plaques chauffantes sont séparés par des tissus d'arrachage afin de protéger le séchoir de l'adhésif. (Figure 4.6)

*Figure 4. 6: Disposition des CP dans le séchoir*

D'après le diagramme de phase de l'eau présentée en annexe 4.1, l'eau dans le contreplaqué sous une pression de 150 mbar commence à s'évaporer à partir d'une température d'environ 55°C. Trois cas d'essais ont été menés en considérant les températures de 60°C, 65°C et 70°C.

Au cours de ce séchage, les contreplaqués sont disposés entre les plaques chauffantes. Des capteurs reliant les CP en trois points différents au microprocesseur permettent de donner à chaque instant les valeurs moyennes de la teneur en eau et de la pression pour la température choisie (Annexe 4.2).

## 4.5 Résultats

La seule variable dont on suit l'évolution est la teneur en eau moyenne du CP. Les courbes d'évolution de la teneur en eau et de la température en fonction du temps, issues des données fournies par le microprocesseur à l'ordinateur sont présentées par la figure 4.7 dans le cas des CP en dabéma pour les 3 niveaux de température considérés.

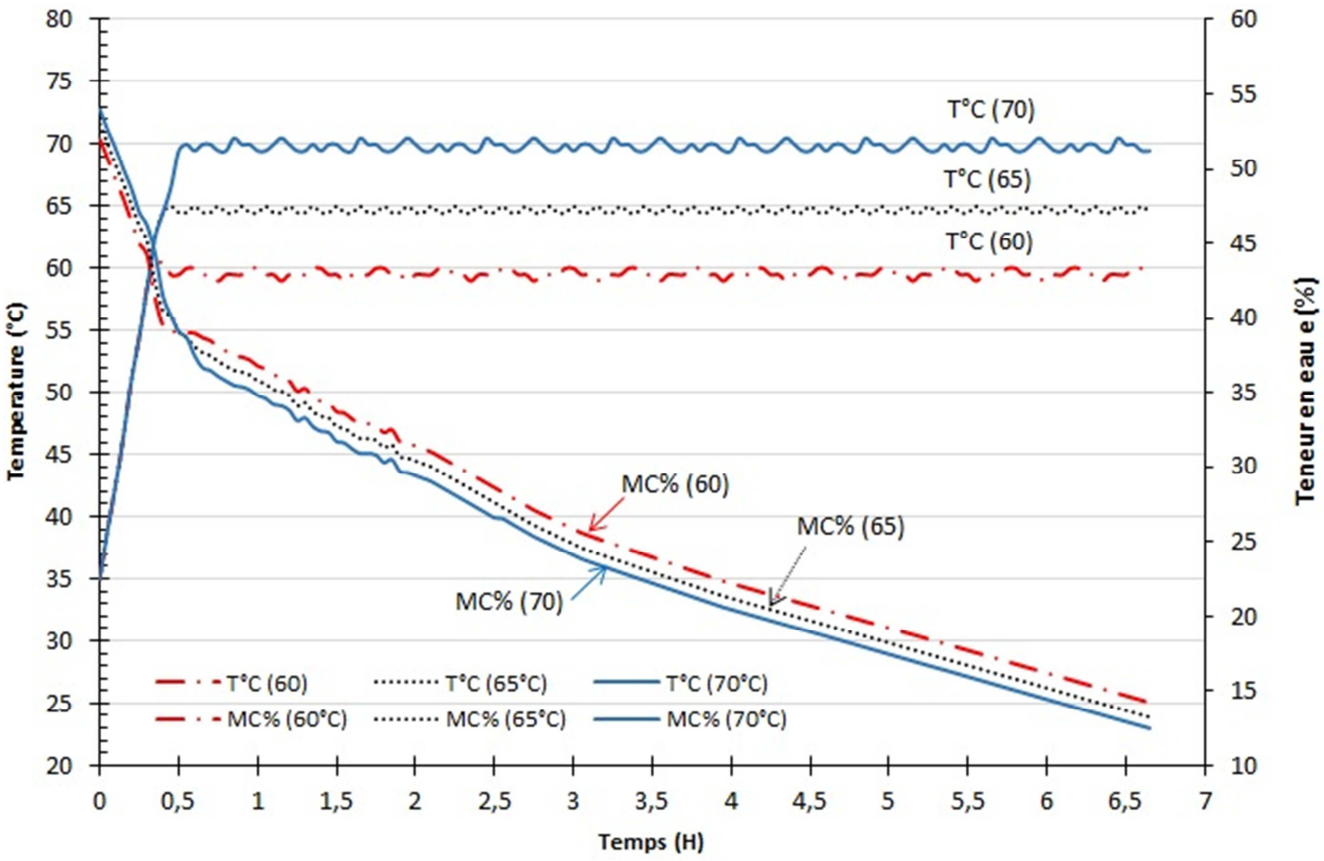
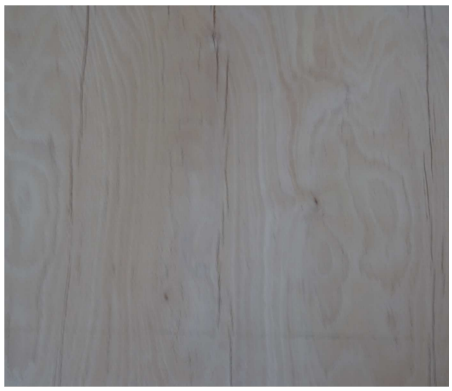



*Figure 4.7 : Evolution de la teneur en eau du CP pendant le séchage sous vide continu des essences de Dabema.*

Ces courbes de la figure 4.7 présentent l'évolution de la teneur en eau des CP pendant le séchage sous vide continu pour chaque valeur de température choisie. Pour la température de 60°C, la teneur en eau initiale dans le CP est de 53%. Elle est de 52% pour la température de 65°C et de 54% pour la température de 70°C. Il apparaît que les plages de températures choisies aboutissent toutes à un même profil d'évolution de la teneur en eau des CP. Au cours des 30 premières minutes, le gradient de teneur en eau est très élevé , ensuite il s'adoucit lorsque les températures se stabilisent.

Les produits obtenus au terme de ces essais présentent toutes des fissures comme l'indiquent les figures 4.8a et 4.8b.



a) CP Hêtre

b) CP Dabéma

*Figure 4. 8 : CP du hêtre et du Dabéma issus du séchage sous vide à 65°C*

## 4.6 Discussion

Nous notons une grande différence en ce qui concerne le temps de séchage entre les conditions sous vide et le séchage à pression atmosphérique. Pour passer de la teneur en eau d'environ 32% à 15% environ 5 heures sont nécessaires dans le premier cas alors qu'il fallait plus de 30h dans le séchage traditionnel. Le séchage sous vide (15mbar) est pratiquement 5 à 6 fois plus rapide. Nous pouvons également souligner l'influence de la température sur la vitesse de séchage.

Les résultats obtenus à partir du séchage sous vide montrent l'apparition des fissures sur les surfaces des contreplaqués du Hêtre et du Dabéma pour les trois cas de température (60°C, 65°C, 70°C). (Figure 4.8), comme nous l'avions observé au chapitre 3, lors des séchages sous conditions atmosphériques.

Ces fissures apparaissent quand les contraintes tangentielles aux cernes d'accroissements dépassent une valeur critique (estimée à 4 MPa obtenue expérimentalement au chapitre 2). Afin de réduire au maximum ces fissures, nous allons profiter des modèles développés dans ce manuscrit pour activer les phénomènes de relaxation viscoélastiques et hygroverrou afin de pouvoir relaxer les contraintes induites par le séchage en continu, en implémentant de façon empirique dans un premier temps des cycles de séchages.

## 4.7 Séchage sous vide continu des contreplaqués avec application d'un cycle de séchage/réhumidification

### 4.7.1 État de l'art sur l'effet de la variation d'humidité sur les contraintes internes de séchage.

Dans cette partie, il est question de comprendre comment évolue le champ de contraintes dans un contreplaqué soumis à des variations d'humidité. Des essais de relaxation en déformation imposée constante, et humidité variable, permettent de mieux comprendre ces phénomènes (Saifouni, 2014). Ils consistent à bloquer les déplacements aux extrémités de l'échantillon et à faire varier l'humidité relative dans la cellule, pour mesurer les forces et la contrainte résultante. Deux scénarii de variation de l'humidité relative ont été considérés. Dans le premier, l'échantillon a été stabilisé dans une ambiance dont l'humidité relative de l'air est de 30 %, puis il est bloqué en déplacement. Deux cycles d'humidité relative ont été appliqués à 50% et 70% (Figure 4.9a). Dans le second, l'échantillon a été bloqué en déplacement après stabilisation dans une ambiance correspondant à une humidité relative de 70%. Par la suite, deux cycles à 50% et 30% de façon consécutive ont été appliqués (Figure 4.9 b). La durée de chaque cycle est d'environ 1h45min, cette durée ayant été jugée suffisante pour assurer l'équilibre hydrique de l'échantillon.

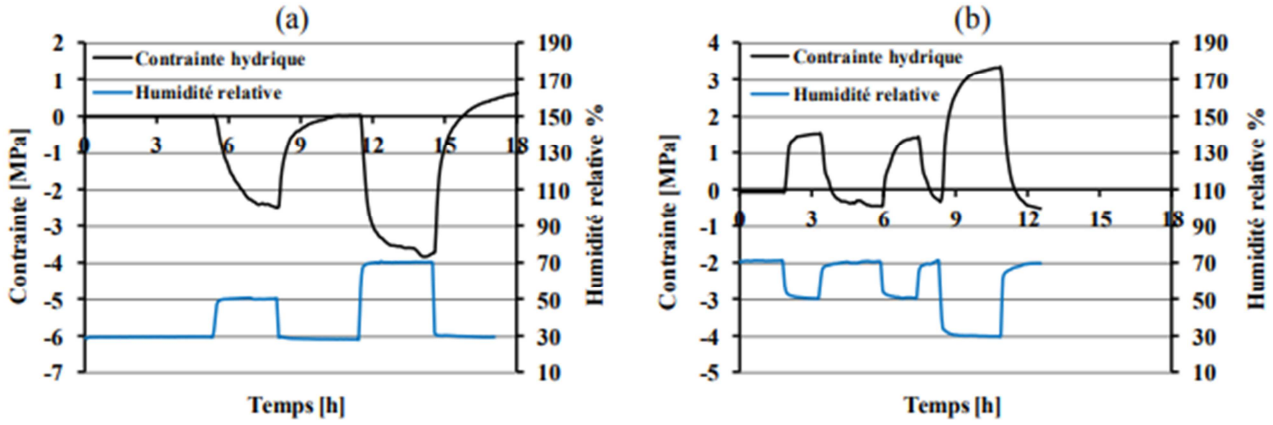



*Figure 4. 9 : Diagrammes des contraintes hydriques en fonction du temps (Saifouni, 2014).*

Sur chaque scénario nous pouvons constater qu'à la fin des différents cycles de séchage/humidification ou réciproquement, il apparaît des contraintes hydriques résiduelles dans les deux cas de figures. Ces contraintes varient en fonction du nombre et de l'amplitude des cycles. C'est un phénomène très complexe car il mobilise plusieurs comportements tels que la viscoélasticité et l'effet hygroverrou qui se produisent dans l'échantillon. Cette complexité pourrait rendre son explication difficile. Une approche de compréhension consiste dès lors à formuler une hypothèse que nous présentons au prochain paragraphe.

### 4.7.2 Hypothèse

Au regard de ce qui précède, on admet que l'application d'un cycle de séchage/humidification au matériau bois, ce procédé génère une relaxation de contrainte pendant le séchage

### 4.7.3 Mode Opératoire

Un cycle de séchage/humidification a été mis en œuvre. La variation de la teneur en eau dans le CP est obtenue par la variation de température. En effet, le dispositif de ce séchoir sous vide ne permet pas au niveau du processeur de programmer une variation cyclique de la teneur en eau mais plutôt une variation continue. Par contre, il est possible de faire varier la température des plaques qui, sous la dépression de 150 mbar et en dessous de la température de 55°C, peut créer une humidification de l'échantillon bois (Annexe 4.1).

Ceci nous permet de définir a *priori* dans le microprocesseur les paramètres qui pilotent le séchage et d'humidification des CP. Pour ce faire, ces paramètres ont été segmentés en 8 phases, chacune d'elles étant caractérisée par une température donnée (Tableau 4.1). Cette température se situe globalement entre 40° et 65°C sur l'ensemble des phases considérées. Le gradient de température entre deux phases est uniforme. Au terme de ce processus, la teneur en eau escomptée est de 15% (Tableau 4.1). Chaque fois que les valeurs de T°C et de teneur en eau dans une phase sont atteintes la phase suivante est déclenchée.

*Tableau 4. 1 : Tableau récapitulatif des valeurs entrées dans le microprocesseur lors de séchage*

| | Phase 1 | Phase 2 | Phase 3 | Phase 4 | Phase 5 | Phase 6 | Phase 7 | Phase 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| W (%) | 32 | 28 | 27 | 24 | 22 | 20 | 18 | 15 |
| P(mbar) | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |
| T° (°C) | 65 | 45 | 65 | 40 | 65 | 60 | 65 | 55 |
| | 1$^{er}$ cycle | | 2$^{e}$ cycle | | 3$^{e}$ cycle | | 4$^{e}$ cycle | |

Dans le cycle 1, la température est fixée à 65°C au-dessus de la température de fusion de l'eau et redescend à 45°C en dessous de celle-ci. L'objectif est de se rapprocher du PSF du bois estimé à 32% sans générer des contraintes. Dans le cycle 2 la température remonte à 65°. Dans le domaine hygroscopique, le séchage sous vide est très rapide, nous avons choisi la température de 40° pour s'assurer d'une réhumidification rapide. Dans les cycles suivant nous nous rapprochons de la teneur en eau cible avec des réhumidification moins drastiques (55° et 65°).

A chaque phase, le microprocesseur affiche la valeur moyenne de la teneur en eau, la pression et la température dans le bois et dans l'enceinte du séchoir (Annexe 4.3). Lorsque les valeurs cibles (température et teneur en eau) d'une phase donnée sont atteintes, la phase suivante est déclenchée automatiquement. Dans le cas contraire, ce déclenchement est opéré manuellement.

A titre d'illustration, les valeurs de température et de teneur en eau de la première phase ont été atteintes (30%, 65°C) ; la deuxième phase est déclenchée automatiquement et la teneur en eau renseignée par les capteurs est de 33%, valeur supérieure à la cible de 28 % (Tableau 4.1). La phase 3 a été par conséquent déclenchée manuellement. Au terme de la phase 4, le taux d'humidité mesuré était de 40%, valeur supérieure à la cible de 27%. Cette dernière est arrivée rapidement à son terme, ce qui a autorisé le déclenchement de la phase 4.

Même si nous avons développé un modèle de diffusion permettant d'identifier le développement des champs de contraintes au séchage, nous avons fait le choix de programmer nos cycles en fonction de l'état de l'art.

Le temps entre les phases est piloté par le temps nécessaire à la stabilisation du teneur en eau du panneau, pour le passage entre la première et la deuxième phase. En ce qui concerne le passage de la deuxième à la troisième, nous avons fait le choix d'augmenter dans un premier temps le temps de séchage afin de réduire au maximum la probabilité de contraintes internes résiduelles (*Jiang et al., 2008).*

### 4.7.4 Résultats

Les échantillons dans le séchoir ont une teneur en eau moyenne initiale de 52% pour une température initiale de 35 °C. La figure 4.10 illustre l'évolution de la température au cours des cycles de séchage/réhumidification, et le profil correspondant de la teneur en eau des contreplaqués, pour une durée globale de séchage de 24 heures.

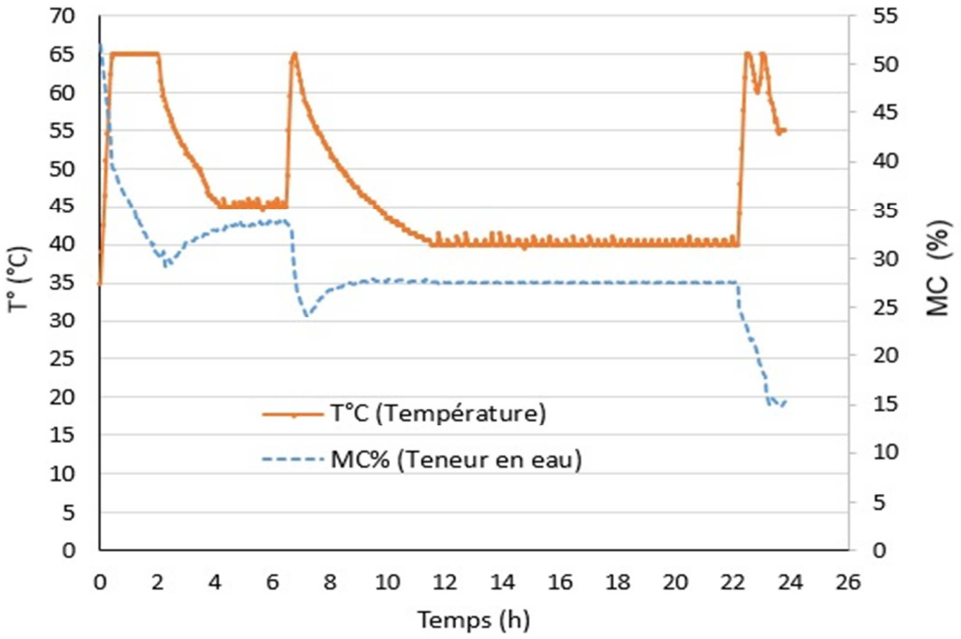



*Figure 4.10 : Évolution de la teneur en eau et de la température au cours du cycle de séchage/humidification sous vide continu du Bété*

Les produits finaux obtenus à partir de ce mode opératoire présentent visuellement une intégrité matérielle et une stabilité géométrique digne d'une fabrication de contreplaqués traditionnelle, mais qui est impossible sur les essences étudiées (Figure 4.11).

Bete Dabema Aningre

*Figure 4. 11: CP du Bété, du Dabéma et de l'aningré issus du cycle séchage/humidification sous vide*

A partir de la figure 4.10, on constate qu'il est possible de réaliser une économie du temps de séchage là où la teneur en eau est pratiquement constante. Pour ce, la même expérience est reprise en contrôlant le tableau de bord du microprocesseur afin de déclencher manuellement les phases concernées. Au terme de ce process, la durée de séchage est de 11 heures (Figure 4.12), ce qui représente une économie de temps d'environ 13 heures. Cette réduction du temps de séchage ne modifie pas la teneur en eau finale du produit.

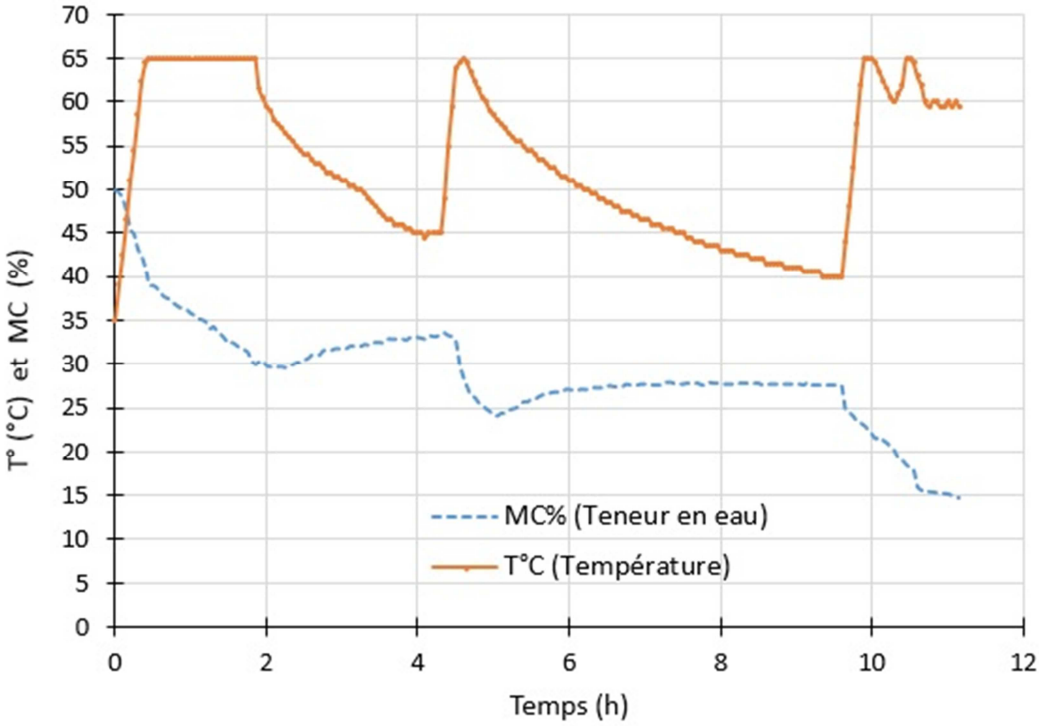



*Figure 4.12 : Évolution de la teneur en eau et de la température au cours du cycle de séchage/humidification sous vide continu du Bété.*

Les produits ont exactement la même morphologie, sans fissurations comme dans la précédente expérimentation. (Figure 4.13).

Bete Dabema Aningre

*Figure 4. 13 : CP du Bété, du Dabéma et de l'aningré issus du séchage sous vide à cycle de désorption et d'absorption*

### 4.7.5 Interprétation

Le procédé de séchage sous vide continu avec variation de température permet la relaxation des contraintes. En repassant temporairement sous la température d'ébullition de l'eau sous vide, le bois peut se réhumidifier. A la fin du séchage, les contraintes dues aux retraits préférentiels du bois n'ont jamais provoqués d'endommagement. L'intégrité et la stabilité géométrique des CP sont maintenu après séchage, pour des essences qui ne sont pas encore valorisées dans le milieu industriel en raison de la difficulté à les sécher. Il s'agit dans notre expérimentation du Bété et spécifiquement du Dabéma qui présente des défauts des fibres considérables.

## 4.8 Caractérisation mécanique des panneaux

Les aspects visuel et géométrique du CP obtenu par ce nouveau procédé ne sont pas suffisants pour un usage en structure. Les propriétés mécaniques ont fait l'objet de caractérisation en flexion pour obtenir le module élastique et les modules de rupture du panneau.

### 4.8.1 Choix du test de flexion sur les panneaux de CP

Différents types d'essais de flexion réalisés sur les contreplaqués sont disponibles dans la littérature. On distingue notamment les tests normalisés de flexion 3 points et 4 points, et l'essai de flexion Bogui.

### 4.8.1.1 Test de flexion 3 Points

Le test de flexion 3 points est utilisé pour contrôler la qualité des panneaux ou caractériser la rupture du matériau (NF EN 310, 1993). Cet essai consiste à appliquer une charge P au centre de l'éprouvette placée sur deux appuis cylindriques parallèles à roulement (Figure 3.14).

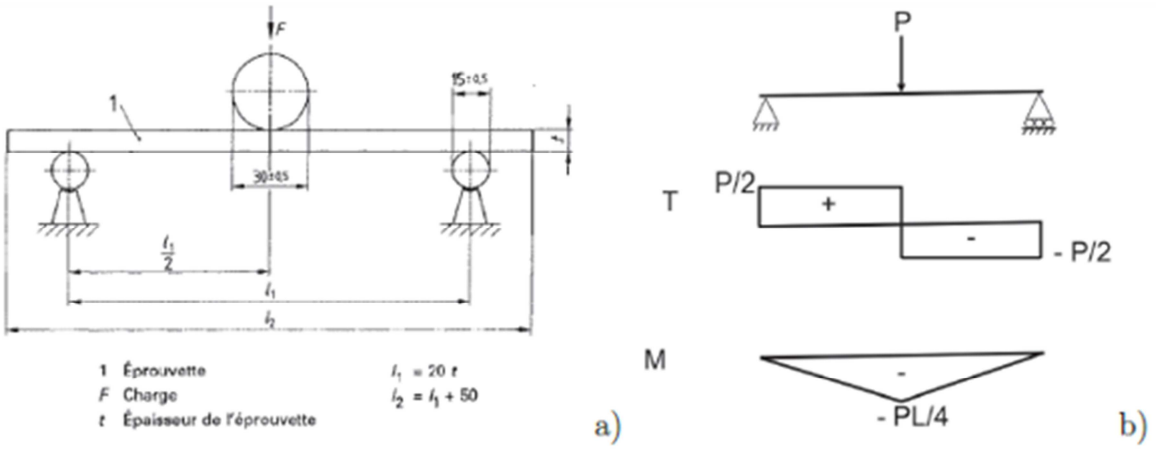



*Figure 4.14: a) Principe de l'essai de flexion 3 points b) Schéma RDM associé, T : effort tranchant, M : moment (NF EN 310)*

Bien qu'il soit très utilisé car facile à mettre en œuvre, cet essai ne permet pas de déterminer correctement les propriétés élastiques des matériaux. En effet, l'effort tranchant présent dans l'échantillon lors du test induit des déplacements transversaux en plus de la courbure due à la flexion. A cela, il faut souligner que le point de chargement est situé au niveau de la zone de rupture du matériau, ce qui peut entraîner une modification des caractéristiques de rupture, par superposition d'un champ de contrainte au niveau de l'appui.

### 4.8.1.2 Test de flexion 4 point de la norme NF EN 789

Le test de flexion 4 points est aussi appelé « flexion pure ». Le moment fléchissant est constant dans la partie centrale de l'éprouvette (entre les deux points de chargement) contrairement à l'essai de flexion 3 points. L'effort tranchant est nul, il n'y a donc pas de cisaillement induit. Les appuis sont linéiques et libres de tourner autour de l'axe x2. Les caractéristiques de l'essai sont décrites dans la norme NF EN 789 (2005). La force appliquée P est mesurée au cours de l'essai, ainsi que la flèche à mi- portée. Ces données permettent de calculer la contrainte de rupture du matériau (équation 3.2) et le module d'élasticité apparent des panneaux en flexion (équation 3.3).

$$\sigma = \frac{M}{I} y \qquad \textit{(eq 4.2)}$$

avec σ la contrainte de rupture (MPa), M = moment de flexion induit par la charge P (N.mm), I= moment d'inertie à la flexion de la section droite ($mm^4$) et y = distance à la fibre neutre (mm)

$$E = \frac{6aL_1^2}{8e^3b}\frac{P}{f} \qquad \textit{(eq 4.3)}$$

avec E= Module d'élasticité (MPa) , a = espacement entre deux appuis (mm), $L_1$ = longueur sur laquelle la flèche est mesurée (mm), b = largeur de l'éprouvette (mm), e = épaisseur de l'éprouvette (mm), P = charge appliquée (N), f = flèche mesurée (mm)

Le schéma de principe de cet essai est présenté sur la Figure 4.15.

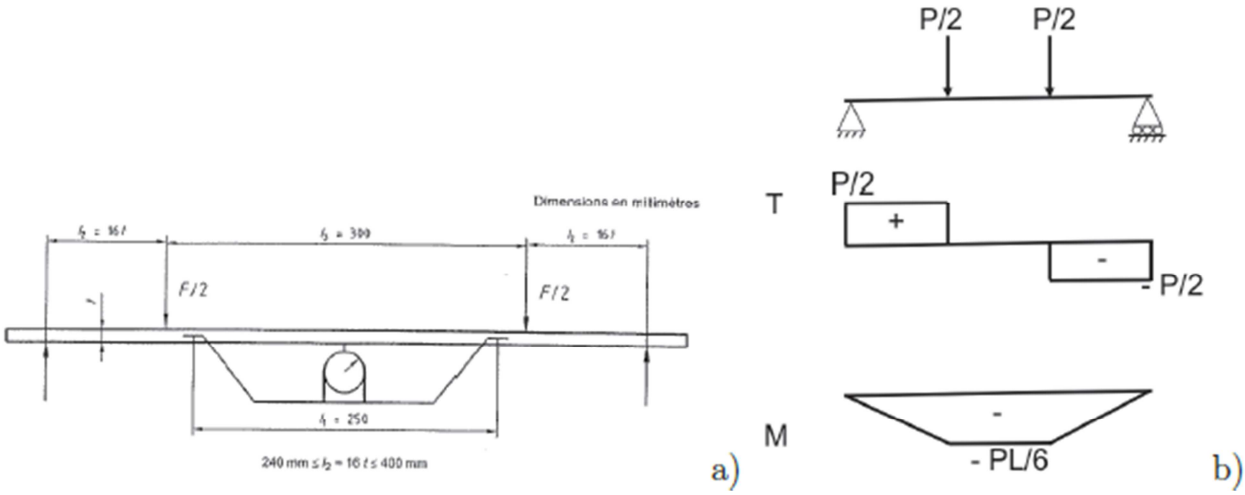



*Figure 4. 15 : a) Principe de l'essai de flexion 4 points (NF EN 789), b) schéma RDM associé, T : effort tranchant, M : moment fléchissant*

### 4.8.1.3 Flexion 4 points de la norme ASTM D3043

Un autre type de test de flexion 4 points est détaillé dans la norme ASTM D3043 (1994). C'est un essai de flexion 4 points similaire à celui présenté dans le paragraphe précédent, avec des appuis extérieurs linéiques libres de pivoter selon l'axe x2 mais également selon l'axe x1 grâce à des roulements (Figure 4.16). Lors de cet essai, le couplage flexion/torsion pouvant apparaitre lors de tests d'éprouvettes ayant des défauts de planéité ou de conception est limité.

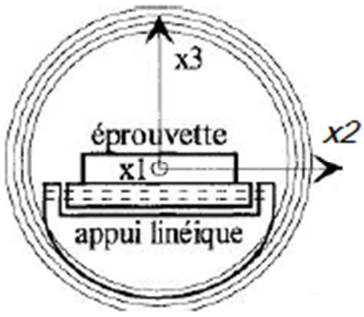



*Figure 4.16 : Détail d'un appui extérieur du bâti de flexion ASTM D3043 méthode B (Bos et al, 1997).*

### 4.8.1.4 Essai de flexion BOGUI

Le dispositif de l'essai de flexion BOGUI a été mis au point par Boss et Guitard (Bos, 1995; Bos et al, 1997 ; Guitard, 1997) pour déterminer les propriétés élastiques des contreplaqués en tant que plaques minces stratifiées. Ledit dispositif est similaire à celui utilisé pour le test de flexion 4 points de la norme ASTM D3043 à la seule différence qu'ici l'on utilise deux appuis ponctuels dans la largeur de l'échantillon au lieu d'un appui linéique. Ces appuis du bâti sont libres de pivoter autour de l'axe long de l'éprouvette (l'axe x1 ). Lors de la réalisation des essais, le risque de poinçonnement de l'éprouvette au niveau des appuis est préservé par interposition des plaquettes d'aluminium. Bos suppose en outre que lorsque les conditions ci-dessous sont remplies, les dispositions expérimentales permettent d'appliquer dans la région centrale de l'éprouvette une sollicitation de flexion pure de composante M1 (M2 = M6 = 0).

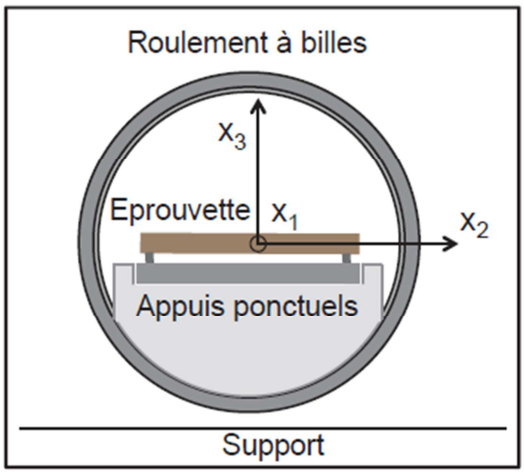



*Figure 4.17 : Principe de l'essai BOGUI (Bos et al, 1997)*

Grâce aux appuis ponctuels et aux roulements, la courbure selon x2 (dite courbure anticlastique) et la torsion sont libérées, les moments de flexion M2 (selon x1) et de torsion M6 sont donc nuls, ce qui permet d'appliquer une flexion pure avec un moment M1 (selon x2) au cours des essais. L'utilisation d'un bâti de flexion 4 points classique permet la mesure de la flèche due à M1, mais également due aux moments M2 et M6. Dans ce cas, les calculs des caractéristiques élastiques des panneaux sont biaisés.

Le contreplaqué étant un produit stratifié, l'essai de flexion BOGUI est l'essai le plus adapté pour caractériser celui-ci ; cependant, compte tenu de la disponibilité des bancs d'essai au sein des Laboratoires I2M et ENSAM de Cluny à la période où nous réalisons nos essais, nous mettrons en œuvre l'essai de flexion quatre points (avec des appuis cylindriques à l'aide d'un dispositif que nous avons conçus). Mais nous ignorerons les hypothèses de Bos concernant les moments $M_2$ et $M_6$ au profit d'une méthode se basant sur la théorie des plaques.

### 4.8.2 Echantillonnage et mode opératoire

Les éprouvettes sont issues des panneaux de contreplaqué de Bete, du dabéma et Aningré fabriquées au laboratoire de l'ENSAM de Cluny (Figure 4.18). Les éprouvettes ont été sélectionnées au hasard dans les panneaux, puis conditionnées en enceinte climatique (20°C, 65% HR) jusqu'à atteindre la teneur en eau d'équilibre de 12 % avant d'être testées. 10 essais ont été réalisés sur des échantillons découpés avec la longueur de l'éprouvette selon l'axe x1 et 10 autres sur des échantillons découpés perpendiculairement au fil du bois des plis extérieurs (longueur de l'éprouvette selon x2).

Les essais mécaniques de flexion dont le principe est illustré par la figure 4.19, sont effectués suivant la norme NF EN 789, 2005 sur des éprouvettes de dimension 600 x 50 x 6mm.

*Figure 4.18 : éprouvettes des différentes essences pour le test de flexion à quatre points.*

### 4.8.3 Mode opératoire

L'équipement utilisé pour les tests est une machine électromécanique pilotée en déplacement de la traverse (Figure 4.19). Le capteur de force utilisé a une capacité de 500 daN. La vitesse de déplacement est fixée une vitesse de 0,04 mm/s pour la détermination des MOE. La portée sur laquelle on effectue la mesure de la flèche f vaut $L_2$=140mm.

Les panneaux ont été testés jusqu'à la rupture, en utilisant ce même dispositif. En effet, la valeur de la contrainte à la rupture est nécessaire lors du dimensionnement des structures par le bureau d'étude.

*Figure 4.19 : Banc d'essai de flexion 4 points*

### 4.8.4 Résultats et discussion

Un exemple de courbe force/déplacement obtenue sur une éprouvette de bété testée selon x1 est donné sur la Figure 4.20. Les valeurs des coefficients directeurs des courbes ( P/f), utilisées pour le calcul des souplesses de flexion sont déterminées par l'équation 4.3.

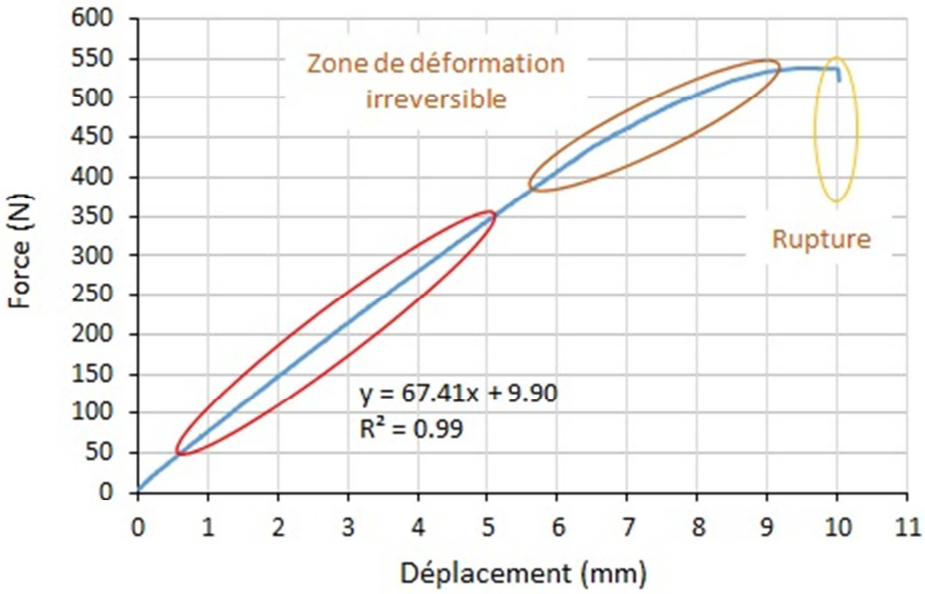



*Figure 4.20 : Exemple de courbe force / déplacement traverse selon la direction x1 des plis extérieurs au cours d'un essai de flexion quatre points de l'essence Bete.*

Le tableau 4.2 présente les valeurs moyennes des modules élastiques et leurs écarts types. L'annexe 4.4 restitue les différentes valeurs obtenues sur l'ensemble des échantillons testés.

*Tableau 4.2 : Caractéristiques élastiques du contreplaqué collé à l'état vert et séché sous vide en utilisant le dispositif de flexion 4 points*

| | **$E_{11}$** | **$E_{22}$** |
|---|---|---|
| Valeur moyenne (MPa) | 7846 | 2957 |
| Nombre d'éprouvettes | 10 | 10 |
| Ecart Type (MPa) | 864 | 239 |

Les valeurs moyennes des contraintes de rupture à 0° et à 90° sont présentées dans le tableau 4.3 et sont issues des résultats des différents essais (Annexe 4.4).

*Tableau 4.3 : Caractéristiques de rupture du contreplaqué collé à l'état vert testé selon x1 (0°) et selon x2 (90°)*

| | **0°** | **90°** |
|---|---|---|
| Valeur moyenne (MPa) | 23.5 | 6.89 |
| Nombre d'éprouvettes | 10 | 10 |
| Ecart-type (MPa) | 3.31 | 0.55 |

Ces travaux ont permis de caractériser les panneaux en élasticité et jusqu'à rupture. Les propriétés mécaniques de flexion sont ainsi connues. Elles sont supérieures à ce que les normes recommandent dans le secteur industriel. (Voir Annexe 4.5).

## Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de proposer des solutions pour limiter au maximum les fissures lors du séchage sous vide des contreplaqués. Ce chapitre est essentiellement expérimental.

Le mécanisme du séchage sous vide basé sur la dépression créée dans l'enceinte du séchoir a été présenté ainsi que le séchoir sous vide à presse type PRESS-XS. Les échantillons sont obtenus à partir du déroulage des billons des essences issues de l'étude du choix multicritère au chapitre 2.

Deux types de séchage ont été pratiqués. Un premier séchage sous vide continu sans application de cycle séchage/humidification qui a permis d'obtenir des produits des CP présentant des fissures pratiquement de même ordre que celles issues de séchage à pression atmosphérique au chapitre 3. Dans le second, en intégrant un cycle de séchage et d'humidification dans le process de séchage sous vide, on a obtenu des produits présentant une intégrité matérielle satisfaisante. Et les propriétés mécaniques obtenues expérimentalement, à l'échelle du matériau sont compatibles avec les exigences normatives des contreplaqués industriels.

# CONCLUSION GENERALE

Ce travail de thèse s'inscrit dans le contexte de valorisation des essences tropicales du Bassin du Congo par l'utilisation de la technologie d'Engineering Tropical Wood Product (qui consiste à valoriser au mieux les bois issus des espèces ligneuses de la forêt tout en préservant d'épuisement celles qui sont menacées) appliqué ici au contreplaqué. Le collage du bois vert par le procédé de pression sous vide des contreplaqués constitue une alternative à la stratégie traditionnelle de développement de ce produit. Il est notamment crédité d'un gain en matière et en énergie comparativement au process traditionnel. Toutefois, l'une des faiblesses potentielles de cette alternative concerne la fissuration des faces externes du produit au terme du processus de séchage (Lavalette, 2014). La présence initiale de défauts dans les plis de bois, et l'orthotropie des plis de bois constituent les principales causes de ce phénomène de dégradation au séchage. L'objectif général de cette thèse concernait le développement d'un modèle de comportement mécanique des contreplaqués collés à l'état vert. L'hypothèse centrale émise est que les fissures apparaissent lorsque la déformation due au retrait engendre des contraintes supérieures à la résistance ultime du matériau, mais qu'il est possible de maitriser celles-ci par un processus de séchage *ad hoc.* L'enjeu majeur de ce travail est de démontrer que même les plis de bois à fort contrefil peuvent être utilisés pour la fabrication des contreplaqués. Il suffit de les maintenir par le collage lors du séchage. L'intérêt est de pouvoir multiplier les essences aptes à une valorisation en CP et donc d'offrir de nouveaux ETWP tout en préservant les espèces ligneuses menacées d'épuisement en forêt.

Le premier chapitre a été consacré à la présentation générale de la gestion forestière du Bassin du Congo. Un accent a été mis sur l'importance du développement des produits des Contreplaqués dans l'industrie du bois et les difficultés rencontrées sur le plan technologique tel que le séchage, le collage, etc. et sur le plan d'approvisionnement des essences. Les forêts du Bassin du Congo, considérées comme le deuxième poumon du monde après l'Amazonie, constituent un des moteurs de l'activité économique sous régionale. Elles représentent une part importante du Produit Intérieur Brut (PIB), contribuent à la création de nombreux emplois au sein de la population active, dans les secteurs formel et informel et servent également de réservoir pour l'alimentation des populations riveraines et la pharmacopée traditionnelle. L'exploitation est dominée par quelques dizaines des essences sur plus de 500 espèces ligneuses (FAO, 2006). L'Okoumé, le Sapelli et l'Ayous représentent à elles seules 54% des productions du secteur formel. La valorisation de ces ressources ligneuses au sein des pays du Bassin du Congo est dominée par la première transformation dont le sciage constitue le principal produit avec une part très importante destinée à l'exportation. Toutefois, ces dernières années, on

observe quelques unités de production de deuxième transformation comme les sciages rabotés qui restent encore marginaux. Mais le principal produit de deuxième transformation est le contreplaqué (environ 151400 $m^3$ produits annuellement). L'état de l'art des technologies industrialisées et des avancées de la recherche ne permettent pas de valoriser sous forme de contreplaqué une large variété d'essences de bois à cause des problèmes de séchage des plis de bois (facteur majeur d'exclusion des essences de bois). Fort de ce constat, le chapitre suivant permet de proposer à la fois un choix d'essences nouvelles et d'intérêt pour le Contreplaqué

Le deuxième chapitre concerne la construction d'une méthodologie permettant de hiérarchiser les choix d'essences de bois, aidant à développer durablement les ETWP de type Contreplaqué. 82 essences ont été investiguées sur la base des critères écologiques (statut de conservation, potentiel exploitable, potentiel de régénération naturelle post-exploitation), d'ingénierie du bois (aptitude au collage traditionnel, durabilité naturelle ou conférée, déroulabilité, rétractabilité, direction des fibres, résistance mécanique) et d'utilisation alternative de la ressource ligneuse (nutrition, soins et croyances). Les méthodes choisies (Electre III et Electre Tri) d'analyse multicritère ont permis d'ordonner les essences selon le degré de consensus entre des objectifs parfois contradictoires. Trois catégories d'essences ont été identifiées pour chaque classe d'usage du contreplaqué, et labélisées « Elevée », « Intermédiaire » et « Faible ». Les essences de catégorie « élevée » satisfont bien l'ensemble des critères. Les essences « intermédiaires » » sont créditées d'une préférence modérée sur une majorité de critères. Toutefois, certaines mesures conservatoires sont nécessaires en vue de garantir la durabilité de leur utilisation dans les CP. Les essences de degré « faible » ne sont pas créditées d'une préférence globale suffisante. Leur promotion dans le développement des CP n'est pas indiquée en raison des risques de conflits avec les populations locales, de performances d'ingénierie pas toujours satisfaisantes ou des risques élevés de déclin à terme. Le tableau ci-dessous présente selon les classes de service et des niveaux de consensus élevé et intermédiaire, les essences déjà utilisées et des nouvelles pour la fabrication des CP.

| Classe de Service | Niveau de consensus Elevé | | Niveau de consensus intermédiaire | |
|---|---|---|---|---|
| | **Essences déjà exploitées en CP** | **Essences non exploitées en CP** | **Essences déjà exploitées en CP** | **Essences non exploitées en CP** |
| 1 | Aningre A, Ayous, Fromager, Ilomba, Lotofa, Onzabili K | Bete, Bete, Dabema, Diana Z, Ebiara yde, Gombe, Kanda, Limbali, Longhi, Mambode, Niove, | Eyong, Frake | Angueuk, Awoura, Bongo H, Difou, Ekaba, Etimoe, Eveuss Kotibe, Landa, Movingui, Oboto, Tali. |
| 2 | Lotofa,. | Bete, Bomanga, Dabema, Ebiara yde, Kanda, Limbali, Mambode | | Angueuk, Awoura Bongo H, Ekaba, Niove, Landa, Longhi, Movingui Oboto |
| 3 | Lotofa | Bete, kanda, limbali | | Bomanga, Bongo H, Dabema, Ebiara yde, Longhi, Mambode, Movingui, Niové, Oboto, Mambode |

La hiérarchie des choix d'essences peut également rendre possible une diversification raisonnée de la matière première ligneuse pour chaque type de contreplaqué considéré, une contribution significative à un prélèvement intensif et équilibré de la ressource ligneuse, ainsi qu'à l'amélioration de l'accessibilité aux essences. Il reste toutefois nécessaire de faire valider les résultats par les principaux acteurs du développement des ETWP ou de le faire à l'aide des expérimentations au sein des laboratoires.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude numérique et expérimentale du comportement mécanique des contreplaqués au cours du séchage. Il a été question ici d'évaluer l'état des contraintes et des déformations dans les contreplaqués au cours de leur séchage sous pression atmosphérique. Les résultats numériques, validés expérimentalement, ont montré que les contraintes maximales au cours du séchage de l'ordre 4,5 MPa sont supérieures à la contrainte de rupture (4 MPa) du bois de Bété, support de cette étude, ce qui est à l'origine de la fissuration des CP. De même, ce modèle a permis de mieux comprendre, et d'évaluer l'évolution des contraintes qui atteint pratiquement son maximum dès les 5 premières heures de séchage.

Le quatrième chapitre a porté sur l'étude expérimentale du séchage sous vide des contreplaqués. Cette technologie a été choisie car elle permet à la fois de presser les plis de bois par pression sous vide pour leur encollage et leur séchage. Elle a l'avantage de pouvoir maitriser les conditions hygrothermiques au bord des plis de bois. Même si le modèle précédent a été construit dans les conditions atmosphériques, il nous aide à appréhender les conditions préalables à la fissuration des plis et à définir les cycles de relaxation des bois lorsque le séchage est trop avancé. En vue de remédier à ces fissures identifiées au chapitre 3, un procédé de séchage sous vide continue avec possibilité de variation de température a été mis en place. Il a permis le séchage et l'humidification des CP pour présenter *in fine* une intégrité matérielle et une stabilité géométrique intéressante pour la plupart des

essences du plan d'expérience. La qualité des CP issus de cette expérimentation satisfont aux exigences normatives autant en termes esthétiques que mécaniques pour toutes les essences, même celles qui sont aujourd'hui inutilisées pour les CP tels que le Bete et le Dabéma (malgré ses contrefils accusés). Ces résultats permettent d'élargir le potentiel exploitable de la forêt du bassin de Congo, c'est-à-dire par exemple de valoriser les très nombreux bois abattus, mais non prélevés lors des exploitations forestières.

En perspectives, il sera question de procéder à l'étude numérique calée sur les paramètres et les conditions physiques du séchage sous vide à cycle de séchage/humidification en prenant en compte l'isotherme de sorption/désorption et où la diffusion se fait dans toutes les directions, afin d'optimiser celui-ci et de valider la cinétique de séchage. Il sera possible d'établir des tables de collages de multiplis de bois de différentes épaisseurs et de différentes essences en grandeur d'emploi et de valider expérimentalement les paramètres physico-mécaniques des plis obtenus numériquement à l'aide des itérations tels que les paramètres viscoélastiques. Une seconde perspective est la capacité des plis de bois verts à se former, notamment former des tubes et autres forme développable dans un premier temps. En effet la pression permanente des bâches à vides associés à la souplesse du bois vert, augmenté par un ajout de chaleur aux besoins permet d'envisager une famille nouvelle de composants à base de bois pour de multiples applications.

# BIBLIOGRAPHIE

**Abdellaoui, M. et Gonzales, C.** 2013. Théorie de l'Utilité Multi Attribut. 35p.

**Agrell, P. J., Stam, A. et Fischer, G.W.** 2004. Interactive multi-objective agro-ecological land use planning: the Bungoma region in Kenya. European Journal of Operational Research, 158, 194-217.

**Aleon, D., Chanrion, P., Negrie, G., Perez, J., Snieg, O.**, 1991. Le séchage sous vide continu à plaques, Ed. CTBA.

**Ananda, J., Herath, G.** 2009. A critical review of multi-criteria decision making methods with special reference to forest management and planning. Ecological Economics, (68) 2535-2548.

**Annual Book of ASTM Standards.** 1994. Construction wood : Plywood in flexure. Designation D 3043 Method B.

**Antoine, J., Fischer, G., Makowski, M.** 1997. Multiple criteria land use analysis. Applied Mathematics and Computation, 83, 195-215.

**Armstrong, L. D. et Kingston, R. S. T.** 1960. Effect of moisture changes in creep in wood, Nature, vol. 185, p.862-863.

**Arnold D.G.., Shyshenko O., Vankerk-Hoven A., Guillermin G. et Gély F**. 2004. Formes et Matériaux dans l'aviation. Ecole Bilingue de Boston. Physique/histoire.

**ATIBT (Association Technique Internationale des Bois Tropicaux)**. 1986. Atlas des bois tropicaux. Tome I – AFRIQUE. 208 p.

**Ayina, O., Etaba, V.** 1996. Résistance des poutres lamellées collées industrielles en bois tropicaux collés aux pénacolites : le cas du bilinga. Bulletin africain Bio-ressources-Energie-Développement, 7, 9-13.

**Baixeras, O.** 1995, Modélisation et mise en œuvre expérimentale du séchage sous vide discontinue du chêne, Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux.

**Bantayan, N.C.et Bishop, I.D.** 1998. Linking objective and subjective modelling for landuse decision-making. Landsc. Urban Plann. 43, 35-48.

**Bazant, Z. P**. 1979. Thermodynamics of solidifying or melting viscoelastic material. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 105, p.933-955.

**Bazant, Z. P.** 1999. : «Constitutive equation of wood at variable humidity and temperature», Wood Science and Technology, Vol. 19, p. 159–177.

**Bazant, Z. P. and Chern, J.C.** 1984. Rate type concrete creep law with reduced time. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 110, p. 329–340

**Bazant, Z. P. and Huet, C.,** 1999. Thermodynamique functions for ageing viscoelasticity: integral form without internal varaiables. International Journal of Solids and structures, n° 36, p. 3993-4016.

**Blackburn, D., Farrell, R., Hamilton, M. and Bradley M.** 2012. Genetic improvement for pulpwood and peeled veneer in Eucalyptus nitens. Canadian Journal of Forest Research Vol. 42(9):1724-1732

**Blackburn, D., Vega, M., Yong, R., Britton, D., Gregory, N**. 2018. Factors influencing the production os structural plywood in Tasmania, Australia from Eucalyptus nitens rotary peeled veneer. Southern Forests, a Journal of Forest Science. Vol 80, Issue 4. Pp 319 – 328.

**Bos, F. et Guitard, D.** 1997. Qualification expérimentale des contreplaqués en flexion quatre points. Annales Sciences Forestières, 54:761–770.

**Bos, F.** 1995. Influence des conditions limites sur la caractérisation mécanique élastique et différée des contreplaqués en flexion. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, Bordeaux, France, 1995.

**Bos, F**. 1995. Influence des conditions limites sur la caractérisation mécanique élastique et différée des contreplaqués en flexion. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, Bordeaux, France, 1995.

**Bos, F. et Guitard, D. 1997.** Qualification expérimentale des contreplaqués en flexion quatre points. Annales Sciences Forestières, 54:761–770.

**Bourreau, D.** 2011. Étude de faisabilité de lamellé-collé endémique en Guyane Française. Thèse de doctorat. Université des Antilles et de Guyane, France, 164p.

**Chantre G.** 1993. L'eau dans le bois, AFOCEL, Fiche Information-Forêt, N° 453

**Chase, C.E.** 1880. The cruising canoe and its outfit. Harper's New Monthly Magazine, (363):395–401.

**Chen Z., Lamb, F.M.** 2004. Vacuum drying process for green hardwood parts. Drying technology, 22(3):577-595.

**Chevaldonnet, F.** 2013. Enquêtes et suivis – La quête du Râle. Bulletin Obsnatu. 29, 5-6.

**CIFOR** (Center for International Forestry Research), Forests for a sustainable future, Annual Report 2014

**CIRAD** (Centre International Pour la Recherche Agricole et le Développement). 2011. Tropix 7.0 : Synthèse des Caractéristiques technologiques de 245 essences tropicales (Technological Characteristics of 245 tropical species). Montpelier, France.

**Clark, L.E. et Sunderland, T.C.H.** 2004. The Key Non-Timber Forest Products of Central Africa: State of the Knowledge. Technical Paper No. 122, USAID. Online at: http://pdf.dec.org/pdf_docs/PNADA851.pdf

**Clouet, B**. 2014. Comportement hydromécanique d'assemblages bois collées à l'état vert : approches expérimentale et numérique. Mécanique [physics]. Université de Bordeaux

**Craveur, J. C.** 2008. Modélisation par éléments finis, DUNOD (ISBN 978-2-10-052126-5)

**CTBA** (Centre technique du bois et de l'ameublement) : N° 114(2007,janv.). A partir de 2007, paraît en ligne www.ctba.fr

**Dahlblom O., Ormarsson S., Petersson H**. 1996. Simulation of wood deformation processes in drying and other types of environmental loading. Annales des sciences forestières, INRA/EDP Sciences, 1996, 53(4), pp.857-866. hal-00883100

**Damaskos, X., Kalkafakou, G.** 2005. Application of ELECTRE III and DEA Methods in the BRP of a Bank Branch Network. Yugoslav Journal of Operation Research 15(2), 259–276

**Daoui, A., Douzet, J., Marchal, R., Zerizer, A.** 2007. Valorisation du bois de pin d'alep par déroulage : optimisation de son étuvage. Bois Et Forêts Des Tropiques, 294(4) : 51–64.

**De La Cruz-Lefevre M., Aleon D., Rémond R., et Perré P.** 2010. Reducing shrinkage defaults and/or time thanks to oscillating drying conditions. 11th International IUFRO Wood Drying Conference. FCBA.

**De La Cruz-Lefevre M., Aleon D., Rémond R., et Perré P.** 2010. Effect of oscillating drying conditions on Variations of the Moisture content Field inside Wood boards. 11th International IUFRO Wood Drying Conference. FCBA.

**de Wasseige C., de Marcken P., Bayol N., Hiol Hiol F., Mayaux Ph., Desclée B., Nasi R.,Billand A., Defourny, P. et Eba'a R.** 2012. Les forêts du bassin du Congo - Etat des Forêts 2010. Eds : Office des publications de l'Union Européenne. Luxembourg. 276 p.

**Devers, D.** 2006. Rapport sur l'état des forêts du bassin du Congo : processus et perspectives. Chercheur, University of Maryland, Observatoire Satellital des Forêts d'Afrique Centrale (OSFAC).

**Dieste A, Krause A, Militz H.** 2008. Modification of Fagus sylvatica with 1,3-dimethylol-4,5-dihydroxy ethylene urea (DMDHEU). Part 1: Estimation of heat of adsorption by the isosteric method (Hailwoood-Horrobin model) and by solution calorimetry. Holzforschung 62:577–583

**Djoufack S.** (2012) : Interview Directeur Technique, ECOCAM.

**Ducrey, M., Labré, P.** 1985. Etude de la régénération naturelle contrôlée en forêt tropicale humide de Guadeloupe. I- Revue bibliographique, milieu naturel et élaboration d'un protocole expérimental. Annals of Forest Science. 42 (3), 297-322.

**Durrieu de Madron L., Forni E. et Mekok M**. 1998. Les techniques d'exploitation à faible impact en forêt dense humide camerounaise. Montpellier, France, Cirad-Forêt,série Forafri, n° 17, 28 p.

**Duveiller, G., Defourny, P., Desclée, B., Mayaux, P.** 2008. Deforestation in central africa : estimates at regional, national and landscape by advanced processing of systematically distributed lands at extracts. Remote sensing of environnement Elsevier, 112,1969-1981.

**Elbez, G., Bend, D.** 1991. Le collage du bois. Centre Technique du Bois et de l'Ameublement. 215 p.

**EN 301.** 2006. Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load- bearing timber structures: classification and performance requirements. CEN, Brussels.

**EN 302-2.** 2004. Adhesives for load-bearing timber structures - Test methods - Part 2: Determination of résistance to delamination.

**EN 335-1.** 2007. Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois – Définition des classes d'emploi - Partie 1: Généralités.

**FAO** (Food and Agriculture Organization) et MINFOF (Ministere des Forets et de la Faune). 2005. Rapport d'inventaire national. Roma. 132 p.

**FAO (Food and Agriculture Organization).** 2006. Global Forest Resources Assessment 2005: progress towards sustainable forest management. FAO Forestry Paper 147. FAO, Rome, 350 p.

**Forenet.** 2010. Résultats d'un Atelier sous-régional sur l'Harmonisation des Revues nationales, sur le thème des Produits Forestiers Non Ligneux en Afrique Centrale. 17-18 Mai 2010, Douala, Cameroun.

**Fouquet, D.** 2009. Durabilité naturelle et préservation des bois tropicaux. Collection Guide Pratique. Editions Quae. 129p.

**Fun, T.S. et Jumaat, M.Z.** 2013. Comparison of European standard EN 310 and EN 789 in determining the bending strength and modulus of elasticity of red seraya (Shorea spp.) plywood panel: experimental and finite element analysis. Eur. J. Wood Prod. Vol. 71, Issue 4, pp 483–490

**Gärdenfors, U., Hilton Taylor, C., Mace, G. M., et Rodríguez, J. P.** 2001. The application of IUCN Red List criteria at regional levels. Conservation Biology, 15 (5), 1206-1212.

**George P. et Miller DG.** 1970. Detection of roughness in moving Douglas-fir. For. Prod.J., 20, 7: 53-59.

**Gérard J., Edi Kouassi A., Daigremont,C., Détienne P., Fouquet, D., Vernay M. et CNRA Abidjan.** Synthèse sur les caractéristiques technologiques de référence des principaux bois commerciaux africains, CIRAD-Forêt.

**Gerard, J.** 1999. Les spécificités du collage des bois tropicaux : essences secondaires et collage multi-essences. Annales GC Bois, French Journal on Timber Engineering. Numéro spécial. Collage structural, 15-40.

**Gérard, J., Edi Kouassi, A., Daigremont, C., Détienne, P., Fouquet, D. et Vernay, M. 2000,** Synthèse sur les caractéristiques technologiques de référence des principaux bois commerciaux africains ; CNRA Abidjan, CIRAD-Forêt.

**Glavin, R. E.** 1946. Molding and gluing press, patent 2,401,299.

**Gougeon, B.** 2005. Gougeon Brothers on Boat Construction: Wood and West System Materials. Gougeon Brothers, fifth edition.

**Gougeon, B.** 2010. Vacuum Bagging Techniques. Gougeon Brothers Inc., 2010.

**Grieser, J.A.** 2004. Timber production and biodiversity conservation in tropical rain forests. Cambridge University Press, 225 p.

**Gril, J.** 1988. Une modelisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure. Thèse de doctorat, Université de Paris 6.

**Guiscafré J.** et **Sales C.** 1997. La belle aventure des bois tropicaux. Bois et Forêts des Tropiques (252) : 39-48.

**Guitard, D. and El Amri, F**. 1987. Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. ann. for. sci., vol.44 / (3) 335-358

**Guitard, D. and Polge, H.,** 1987. Mécanique des matériaux bois et composites. Collection Nabla, ISSN 0768-2271, Toulouse France : Cépaduès éditions.

**Guitard, D**.1987. Mécanique matériau bois et composites. Cépaduès.

**Hamilton M.G., 1,2, Freeman1,3 S.J., Blackburn1,4 D.P., Downes5 G.M., Pilbeam6 D.J. & Brad M Potts1** . 2017. Independent lines of evidence of a genetic relationship between acoustic wave velocity and kraft pulp yield in Eucalyptus globulus. Annals of Forest Science. DOI 10.1007/s13595-017-0617-2

**Hanhijarvi, A.,** 1995. Modelling of creep strain mechanism in wood. Thèse de doctorat, Espoo University, Finland.

**Hecker, M.** 1995. Peeled veneer from Douglas-fir : Influence of round wood storage, cooking and peeling temperature on surface roughness. Proceedings of 12th International Wood Machining Seminar, October 2-4, Kyoto, pp: 92- 101.

**Heebink, B.G**. 1943. Bag molding of plywood. Technical Report 1431, U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison 5, Wisconsin.

**Herritsch, A**. 2007. Investigations on Wood Stability and Related Properties of Radiata Pine. Thesis University of Canterbury.

**Hunt, D.** 1984. Creep trajectories for beech during moisture changes under load. Journal of Material Science, 19, p. 1456–1467.

**Hunt, D.** 1988. Longitudinal moisture-shrinkage coefficients of softwood at the mechanosorptive creep limit. Wood Science and Technology, 22, p. 199–210.

**Husson, J.M., Dubois, F. et Sauvat, N.** 2010. Elastic response in wood under moisture content variations: analytic development. Mechanics of Time-Dependent Materials, vol. 14, p. 203-217.

**IMO (International Marine Organization).** 2002. Antifouling systems, 31 p.

**Ingram, V., Ndoye, O., Iponga, D.M., Tieguhong, J.C., Chupezi, J. et Nasi, R.** 2012. Les produits forestiers non ligneux : contribution aux économies nationales pour une gestion durable. In Etat des Forêts de l'Afrique centrale 2010, Publication Office of European Union, Luxembourg, 137-154.

**IUCN.** (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources), 2013. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2013.1. <www.iucnredlist.org> Downloaded on 6 July 2013.

**IUCN.** 2018. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2018.1. <www.iucnredlist.org> Downloaded on 6 July 2018.

**Jannot, Y**. Isotherme de sorption : modèles de determinations.

**Jiang, J. Lu, J. Yan, H.** 2008. Dynamic viscoelastic propertiesof wood treated by three drying methods measured athigh-temperature range. Wood Fiber Sci 40(1):72-79.)

**Joly, P., More-chevalier.** 1980. Théorie, pratique et économie du séchage des bois, Ed. H. VIAL-Dourdan.

**Kangas, J., Kangas, A.** 2005. Multiple criteria decision support in forestmanagement-the approach, methods applied, and experiences gained. For. Ecol.Manag. 207, 133e143.

**Karsenty, A., Gourlet-Fleury, S.** 2006. Assessing sustainability of logging practices in the Congo Basin's managed forests: the issue of commercial species recovery. Ecology and Society 11 (1), 26.

**Langrish, T.A.G.** 2013. Comparing continuous and cyclic drying schedules for processing hardwood timber : the importance of mechanosorptive strain. Drying technology, (31):1091-1098.

**Lavalette, A.** 2013. Développement de contreplaquées pour la construction navale : caractérisation multi échelle et compréhension des phénomènes de collage du pin maritime à l'état vert, Thèse, Université de Bordeaux.

**Leicester, R.H.** 1971. «A rheological model for mechano-sorptive deflections of beams», Wood Science and Technology, 5, p. 211–220.

**Macary, F., Ombredane, D. and Uny, D.** 2010. A multicriteria spatial analysis of erosion risk into small watersheds in the low Normandy bocage (France) by ELECTRE III method coupled with a GIS. International Journal of Multicriteria Decision Making, 1 (1), 25-48.

**Mangin, J.C.** 2004. Cours d'optimisation multicritère et d'aide à la décision. Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Chambéry. Modélisation des préferences, méthodes d'agrégation, methodes de surclassement. 53 p.

**Martensson, A.** 1992. Mechanical behavior of wood exposed to humidity varaiation. PhD Thesis. Report TVBK-1006, Lund University, Sweden

**Martensson, A., Svenson, S.** 1997. Stress-strain relationship of drying wood. Part1: Development of constitutive model, Holtzforchung, vol. 51, p. 472-478.

**Martin, C.** 2006. Les systèmes de terrasses cévenols. Exemple de la vallée obscure et du vallon du Rouquet. Etude de géographie physique. Projet interreg IIIB SUDOE "TERRISC", UMR Espace, CNRS : 153p.

**Mendoza, G.A. et Martins, H.** 2006. Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms. Forest Ecology and Management, 230, 1-22.

**Merad, M., Dechy, N., Serir, L., Grabisch, M. et Marcel, F.** 2013. Using a multicriteria decision aid methodology to implement sustainable management principles within an organization. European Journal of Operational Research, 224 (3), 603-613.

**Merakeb, S.** 2006. Modélisation des structures en bois en environnement variable. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 146 p.

**Meylan, B.** 1972. The influence of microfibril angle on the longitudinal shrinkage-moisture content relationship. Wood Sci. Technol. 6, 293-301.

**MINEF (Ministère de l'Environnement et des Forêts)**. 2001. Arrêté n° 222/A/MINEF du 25 mai, fixant les procédures d'élaboration, d'approbation, de suivi et de contrôle de la mise en oeuvre des plans d'aménagement des forêts de production du domaine permanent. Yaoundé, Cameroun. 18 p.

**Mothe F., Marchal, R. et Tatischeff, W. T.** 2000**.** Sécheresse à cœur du Douglas et aptitude au déroulage : recherche de procédés alternatifs d'étuvage. I. Répartition de l'eau dans le bois vert et réhumidification sous autoclave. Annals of Forest Science, Springer Verlag/EDP Sciences, 2000, 57 (3), pp.219-228.

**Mouchot, N., Wehrer, A., Bucur, V., et Zoulalian A.** 2000. Détermination indirecte des coefficients de diffusion de la vapeur d'eau dans les directions tangentielle et radiale du bois de hêtre. Annals of Forest Science, vol. 57, pp 793–801.

**Mukuday, S., and Yata, S**., 1986. Modeling and simulation of viscoelastic behavior (tensile strain) of wood under moisture change. Wood Science and Technology, 20, p.335–348.

**Mvogo, J.K.** 2008. Regroupement mécanique par méthode vibratoire des bois du bassin du Congo. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux 1. 165p.

**Nasi R., Billand A. and Van Vliet N.** 2011. Empty forests, empty stomachs: bushmeat and livelihoods in Congo and Amazon Basins. International Forestry Review. p. 355-368.

**Navi, P. et Heger, F.** 2005. Comportement thermo-hydromécanique du bois. Application technologiques et dans les structures. Presses Polytechniques et universitaires romandes.

**Nebesar, P.J.** 1952. Molded boat hull, patent 2,617,126.

**NF EN 326-1.** Panneaux à base de bois Echantillonnage, découpe et contrôle Partie 1 : Echantillonnage et découpe des éprouvettes et expression des résultats d'essai

**NF-EN 310. 1993.** Panneaux à base de bois - Détermination du module d'élasticité en flexion et de la résistance à la flexion.

**NF-EN 314.** 1993. Contreplaqué : Qualité du collage.

**NF-EN 789, 2005.** : Structures en bois - Méthodes d'essai : Détermination des propriétés mécaniques des panneaux à base de bois.

**Ngo, D. and Pfeiffer, E**. 2003. The art of plywood furniture. Princeton Architectural Press, New York.

**Nguyen, S.L.** 2016. Modélisation hydromécanique du bois: application au sapin blanc du Massif Central. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II. NNT: 2016CLF22717. tel-01477173.

**Njiti, C.F.and Sharpe, D.M.** 1994. A goal-programming approach to the management of competition and conflict among land uses and in the tropics: the Cameroon example. Ambio, 23, 112-119.

**Nsouandélé, J. L., Bonoma, B., SimoTagne, M. et Njomo, D.,** 2009. Détermination du coefficient de diffusion de l'eau dans les bois tropicaux. (Yaoundé).

**OFAC.** 2013 : Les forêts du bassin du Congo – État des Forêts 2013. Éds: de Wasseige C., Flynn J., Louppe D., Hiol Hiol F., Mayaux Ph. – 2014. Weyrich. Belgique. 328 p. Dépôt légal : D/2014/8631/30 ISBN : 978-2-87489-298-1

**OFAC/CIFOR**, Richard Eba'a Atyi, Paolo Cerutti, Guillaume Lescuyer, Carlos de Wasseige, Nicolas Bayol, Alain Karsenty : Partenariat pour les Forêts du Bassin du Congo –2009 : CIRAD, CIFOR, UCL, Forêt Ressources Management, Union Européenne.

**Ormarsson S., Dahlblom O., Petersson H**.1999. A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation. Part 2: Simulation of drying board, Wood Science and Technology (33) 407±42 Springer-Verlag 199.

**Oum L.R., Pommier R., Breysse D., Ayina Ohandja L.M., Dong A M**. 2016. Clustering for preservation of endangered timber species from the Congo Basin. Journal of Tropical Forest Science Volume 28(Issue 1):78-94

**Oum L.R., Pommier R., Taillandier, F., Mvogo, J.K., Breysse, D., Ayina Ohandja, L.M**.(2018) A decision support tool approach based on the Electre TRI-B method for the valorisation of tropical timbers from the Congo Basin: an application for glulam products. Journal of Tropical Forest Science Pages 361-371

**Oum, R. L.** 2014. Classification multicritère et collage structural d'essences de bois du bassin du Congo, limitant l'impact sur la biodiversité, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux et de Yaoundé 1.

**Paumgarten, F., Shackleton, C.** 2009. Wealth differentiation in household use and trade in non-timber forest products in South Africa. Ecological Economics, 68, 2950–2959.

**Perré, P. et E. Agoua, E**. 2010. « Mass transfer on wood : identification of structural parameters from diffusivity and permeability measurements. », Journal of Porous Media, vol. 13, no. 11, p. 1017–1024.

**Perré, P., S. Zohoun, S., Brandao, A.** 1996. Détermination de la diffusivité massique en régime permanent : résultats d'une campagne de mesure sur différentes essences tempérées et tropicales. (Nancy).

**Pinta, F, Fomété T.** 2004. Filière bois au Cameroun : vers une gestion durable des forêts et une transformation industrielle performante ? Bois et Forêts des Tropiques (281) : pp. 71-85.

**Pittet V.** 1996. Etude expérimental des couplages mécanosorptifs dans le bois soumis à variations hygrométriques contrôlées sous chargements de longue durée, PhD thesis n° 1526, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Swit-zerland

**Pommier R.,** 2006, Compréhension de l'aboutage du bois vert : élaboration du procédé et principes physico-mécaniques appliqués au Pin maritime, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux.

**Randriambololona H.** 2003. Modélisation du comportement différé du bois en environnement variable. PhD Thèse, Université de Limoges, Faculté des Sciences, France.

**Ranta-Maunus, A**. 1975. The viscoelasticity of wood at varying moisture content. Wood Science and Technology, Vol. 9, p. 189-205.

**Roy, B., et Bouyssou B.** 1993. Aide multicritère à la décision : méthodes et cas. Paris: Economica, 695p.

**Saaty, T.L.** 1990. How to make a decision : The Analytical Hierarchy Process. European Journal of Operationnal Research, 48, 9 – 26.

**Saifouni, O.** 2014. Modélisation des effets rhéologiques dans les matériaux: application au comportement mécanosorptifdu bois. Thèse de doctorat, Université de Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.

**Sala, O., Chapin, F., Stuart, I., Amesto, J.J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Huber-Sandwald, E., Huenneke, L.F., Jackson, R.B., Kinzig, A., Leemans, R., Lodge, D.M., Mooney, H.A., Oesterheld, M., Poff, N. L., Sykes, M.T., Walker, B.H., Walker, M., Wall, D.H.** 2000. Global Biodiversity Scenarios for the year 2100. Review Biodiversity, 287, 1170-1174.

**Salin, J.G.** 1992. Numerical prediction of checking during timber drying and a new mechanosorptive creep model. HolzalsRoh und Werkstoff, (50) pp195-200.

**Santaoja K., Leino T., Ranta-Maunus A. et Hanhijärvi A**. 1991. Mechano-sorptive structural analysis of wood by the ABAQUS finite element program. Report number: 1276. Affiliation: Research Notes Technical Research Centre of Finland

**Schneemann, J.** 1995. Exploitation of Moabi in the humid dense forests of Cameroon. Harmonization and improvement of two conflicting ways of exploitation of the same forest resource. BOS Newsletter, 14, 20–32.

**Siau, J. F.** 1971. Flow in wood. Syracuse, N.Y : Syracuse University Press, 1971.

**Simon, F., 2001.** Endommagement et rupture des joints collés sollicités en traction ou cisaillement. Application au collage du bois. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, Bordeaux, France.

**Sretenovic, A., Müller, U., Gindl, W.** 2005. Comparison of the in-plane shear strength of OSB and plywood using five point bending and EN 789 steel plate test method. Holz Roh Werkst. 63:160–164.

**Stevens W. C., et Turner, N.** 2008. Wood Bending Handbook. Fox Chapel Publishing Company, USA.

**Stückelberger, J.A., Heinimann, H. R. et Burlet, E.C.** 2006. Modeling spatial variability in the life-cycle costs of low-volume forest roads. European Journal of Forest Research 125: 377–390.

**Taillandier, P. et Taillandier, F.** 2011. Multi-criteria diagnosis of control knowledge for cartographic generalization. European Journal of Operational Research, 217, 633–642

**Tchatat, M. et Ndoye, O.** 2006. Etude des produits forestiers non ligneux d'Afrique Centrale : réalités et perspectives. Bois et Forêts des Tropiques, 289 (3), 27-39.

**Thibaut B.** 1988. Le processus de coupe du bois par déroulage. Thèse d'état en Sciences, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier: pp 354.

**Toratti, T.** 1992. Creep of timber beams in variable environment. PhD Thesis, Helsinki university of Technology.

**Torres S.S., Jomaa W., Puigali J.R., Avramidis S.** 2011. Multiphysics modeling of vacuum drying of wood. Applied Mathematical Modelling. 35:5006-5016.

**Tremblay, C., Cloutier A., et Fortin, Y.** 2000. Experimental determination of the convective heat and mass transfer coefficients for wood drying. Wood Science and Technology, vol. 34, p. 253–276.

**Villiere, A.** 1964. Le séchage des placages dans l'industrie du contreplaqué, Revue Bois et Forêts des Tropiques, N° 96, Juillet-Août

**Von Neumann J. et Morgenstern, O.** 1944. Theory of Games and Economic Behavior. Princeton University Press. New Jersey.

**Washusen, R., Harwood, C., Morrow, A., Northway, R., Valencia, J.C., Volker, P., Wood, M., and Farrell, R.** 2009. Pruned plantation-grown Eucalyptus nitens: Effect Page 50 of 140 of thinning and conventional processing practices on sawn board quality and recovery. New Zealand Journal of Forestry Science (38)39-55.

**Wong, A.H.H., Kim, Y.S., Singh A.P., and Ling, W.C.** 2005. Natural Durability of Tropical Species with Emphasis on Malaysian Hardwoods – variations and prospects. InThe International research group on wood preservation, the 36th annual meeting, Bangalore, India, 1-34.

**Yahiaou, K.** 1991. A rheological model to account for mechano-sorptive behavior. Cost 508, Wood Mechanics: Fundamental aspects on creep in wood, Lund 1991.

**Yeo, H., Smith, W.B. and Hanna, R.B.** 2002. Mass transfer in wood evaluation with a calorimetric technique and numerical analysis. Wood and Fiber Science, Vol. 34, n° 4, pp. 657-665.

**Youngquist, J.A.** 1999. Wood-based composites and panel products. Wood handbook : wood as an engineering material. Madison, WI : USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, GTR-113: pp 10.1-10.31.

# ANNEXES

Annexe 1.1 : Essences interdites d'exportation en grumes à partir de 1999. ..... 145
Annexe 1.2 : Propriéts mécaniques du Contreplaqué. ..... 145
Annexe 2.1 : Indication des plans d'amenagement exploités pour l'étude multicritère du choix des essences pour la fabrication des Contreplaqués. (Plans approuvés du domaine forestier du Cameroun 2012.) ..... 151
Annexe 2.2 : Essences exploitées ou recensés dans quarante-cinq (45) plans d'aménagement représentatifs des concessions forestières au cameroun. ..... 152
Annexe 2.3 :. Stratégies de pondération multicritère et procedure de surclassement ..... 155
Annexe 2.4 Hiérarchisation catégorielle des essences de bois pour un usage en classe 1 ..... 158
Annexe 2.5 : Hiérarchisation catégorielle des essences de bois pour un usage en classe 2 ..... 159
Annexe 2.6 : Hiérarchisation catégorielle des essences de bois pour un usage en classe 3 ..... 160
Annexe 2.7 : Liste des 20 essences les plus récoltées dans la partie camerounaise du Bassin du Congo en 2010 ..... 161
Annexe 2.8: Les contreplaqués selon les essences exportées entre 2004-2012 en % ..... 161
Annexe 3.1: L Modèle de Maxwell généralisé ..... 161
Annexe 3.2 : Tableau recapitulatif des résultats des tests de traction de l'essence Bete : ..... 164
Annexe 4.1 : Diagramme de phase de l'eau ..... 164
Annexe 4.2 : Teneur en eau du CP et pression dans l'enceinte de séchage pour une température de 65°C, renseignées par un microprocesseur ..... 165
Annexe 4.3 : Teneur en eau du CP et pression dans l'enceinte de séchage pour une température de 65°C, renseignées par un microprocesseur ..... 165
Annexe 4.4 : Tableau récapitulatif des résultats des tests de flexion quatre points du CP issu de l'essence Bete : ..... 166
Annexe 4.5 : Caractéristiques et dimensionnement des CP : ..... 167

## Annexe 1.1 : Essences interdites d'exportation en grumes à partir de 1999.

*Source : ministère de l'Environnement et des Forêts du Cameroun.*

| Nom Commun | Nom Scientifique |
|---|---|
| Abam / Longhi | *Gambeya africana* |
| Acajou / Ngollon | *Khaya* sp. |
| Aniégré | *Aningeria altissima* et *A. robusta* |
| Assamela / Afrormosia | *Pericopsis elata* |
| Bété | *Mansonia altissima* |
| Bossé | *Guarea cedrata* et *G.thompsonii* |
| Bubinga | *Guibourtia tesmanii, G. demeusei* |
| Dibétou / Bibolo | *Lovoa trichilioides* |
| Douka / Makoré | *Tieghemella africana* |
| Doussié | *Afzelia pachyloba, A.bidipensis, A. africana* |
| Fromager / Ceiba | *Ceiba pentandra* |
| Ilomba | *Pycnanthus angolensis* |
| Iroko | *Milicia excelsa* |
| Moabi | *Baillonella toxisperma* |
| Movingui | *Distemonanthus benthamianus* |
| Ovengkol | *Guibourtia ehie* |
| Padouk | *Pterocarpus mildbraedii* et *P. soyauxii* |
| Pao rosa | *Swartzia fistuloides* |
| Sapelli | *Entandrophragma cylindricum* |
| Sipo | *Entandrophragma utile* |
| Wenge | *Milletia laurentii* |
| Zingana | *Microberlinia bisulcata* |

## Annexe 1.2 : Propriéts mécaniques du Contreplaqué.

Le comportement mécanique du contreplaqué se décline en quatre points, à savoir : les hypothèses de base, les équations d'équilibre, les relations entre les déformations et les déplacements et la loi de comportement élastique.

### 1. Hypothèses de base

Le comportement mécanique du CP peut être renseigné en utilisant la théorie des plaques minces dont les hypothèses de base sont les suivantes (Guitard, 1987) :

- Les points matériels positionnés sur une normale au plan moyen de la plaque avant déformation, restent sensiblement alignés sur une normale à la déformée du plan moyen; de ce fait les déformations de cisaillement $\boldsymbol{\gamma_{xz}}$ et $\boldsymbol{\gamma_{yz}}$ sont négligeables ;
- L'épaisseur $\boldsymbol{e}$ (qui est supposée constante) de l'élément est très faible par rapport aux deux autres dimensions (longueur et largeur) ;
- Les déplacements $\boldsymbol{u_0(x,y,0)}$, $\boldsymbol{v_0(x,y,0)}$ sont considérés comme négligeables ;
- Les déformations $\boldsymbol{\varepsilon_x}$, $\boldsymbol{\varepsilon_y}$, et la distorsion $\boldsymbol{\gamma_{xy}}$ sont faibles ;
- Les déplacements $\boldsymbol{u}$ et $\boldsymbol{v}$ sont des fonctions linéaires de z ;
- La contrainte normale $\boldsymbol{\sigma_z}$ est négligeable devant les termes $\boldsymbol{\sigma_x}$ et $\boldsymbol{\sigma_y}$ (contraintes planes)
- On se limite au domaine élastique où la loi de Hooke est applicable ;
- $\boldsymbol{\tau_{xz}}$ et $\tau_{yz}$ sont nulles à la surface de l'élément $\left(\boldsymbol{z} = \mp\frac{\boldsymbol{e}}{\boldsymbol{2}}\right)$ ;

Ces hypothèses, dites de Kirchhoff-Love (sans déformation due à l'effort tranchant) correspondent aux plaques minces, (Craveur, 2008). On note :

- $u(x,y)$ : déplacement résultant suivant la direction $\vec{x}$ ;
- $v(x,y)$ : déplacement résultant suivant la direction $\vec{y}$ ;
- $w(x,y)$ : déplacement résultant suivant la direction $\vec{z}$ ;
- $u_0(x,y)$ : déplacement suivant la direction $\vec{x}$ dû à la charge $p_x$ ;
- $v_0(x,y)$ : déplacement suivant la direction $\vec{x}$ dû à la charge $p_y$ ;
- $w_0(x,y)$ : déplacement suivant la direction $\vec{z}$ dû à la charge verticale $p_z$ ;
- $\varepsilon_x$ , $\varepsilon_y$ : déformations résultantes suivant les directions $\vec{x}$ et $\vec{y}$ ;
- $\varepsilon_x^0$ , $\varepsilon_y^0$ : déformations suivant les directions $\vec{x}$ et $\vec{y}$ dues aux charges $p_x$ et $p_y$ ;
- $\sigma_x$ , $\sigma_y$ , $\sigma_z$ : contraintes normales suivant les directions $\vec{x}$ , $\vec{y}$, $\vec{z}$ ;
- $\gamma_{xy}$ : distorsion dans le plan $xy$ ;
- $\gamma_{yz}$ : distorsion dans le plan $yz$ ;
- $\gamma_{xz}$ : distorsion dans le plan $xz$ ;
- $e$ : épaisseur du panneau de contreplaqué ;

Les figures 1.10 et 1.11 illustrent le déplacement vertical et les déplacements latéraux.

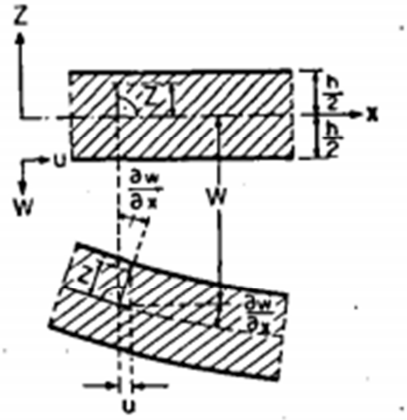



*Figure 1.10 : Déplacement vertical (Dubas, 1955)*

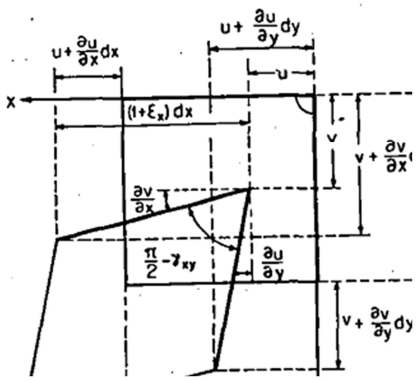



*Figure 1.11 : Déplacements latéraux (Dubas, 1955)*

## 2. Equations d'équilibre

Elles résultent des hypothèses précédentes. Le champ de déplacement d'un point quelconque $\boldsymbol{P(x,y,z)}$ est entièrement défini à partir des composantes du champ de déplacement du point homologue $P_0(x,y,0)$ du plan moyen notées : $\boldsymbol{u_0(x,y), v_0(x,y)}$ ***et*** $\boldsymbol{w_0(x,y) = w(x,y)}$ (Guitard, 1987; Bos, 1996).

Si l'on note :

- $\boldsymbol{N_x}$ , $\boldsymbol{N_y}$ : effort normal suivant les directions $\vec{x}$ et $\vec{y}$ ;

$$N_x = \int_{-\frac{e}{2}}^{\frac{e}{2}} \sigma_x \cdot dz \qquad \textit{(eq 1. 6)}$$

$$N_y = \int_{-\frac{e}{2}}^{\frac{e}{2}} \sigma_y \, dz \qquad \textit{(eq 1. 7)}$$

- $\boldsymbol{N_{xy}}$ : effort de cisaillement suivant les directions $\vec{x}$ et $\vec{y}$ ;

$$N_{xy} = \int_{-e/2}^{e/2} \tau_{xz} \, dz \qquad \textit{(eq 1. 8)}$$

- $\boldsymbol{M_x}$ **,** $\boldsymbol{M_y}$ : moment fléchissant suivant les directions $\vec{x}$ et $\vec{y}$ ;

$$M_x = \int_{-\frac{e}{2}}^{\frac{e}{2}} \sigma_x \cdot z \, dz \qquad \textit{(eq 1. 9)}$$

$$M_y = \int_{-\frac{e}{2}}^{\frac{e}{2}} \sigma_y \cdot z \, dz \qquad \textit{(eq 1. 10)}$$

- $\boldsymbol{M_{xy}}$ : moment de torsion dans le plan $xy$

$$M_{xy} = M_{yx} = \int_{-e/2}^{e/2} \tau_{xz} \cdot z \, dz \qquad \textit{(eq 1. 11)}$$

- $\boldsymbol{Q_x}$ **,** $\boldsymbol{Q_y}$ : efforts tranchants suivant les directions $\vec{x}$ et $\vec{y}$ ;

$$Q_x = -\int_{-\frac{e}{2}}^{\frac{e}{2}} \tau_{xz} \cdot dz \qquad \textit{(eq 1. 12)}$$

$$Q_x = -\int_{-\frac{e}{2}}^{\frac{e}{2}} \tau_{yz} \, dz \qquad \textit{(eq 1. 13)}$$

Ces sollicitations sont représentées dans la figure 1.12.

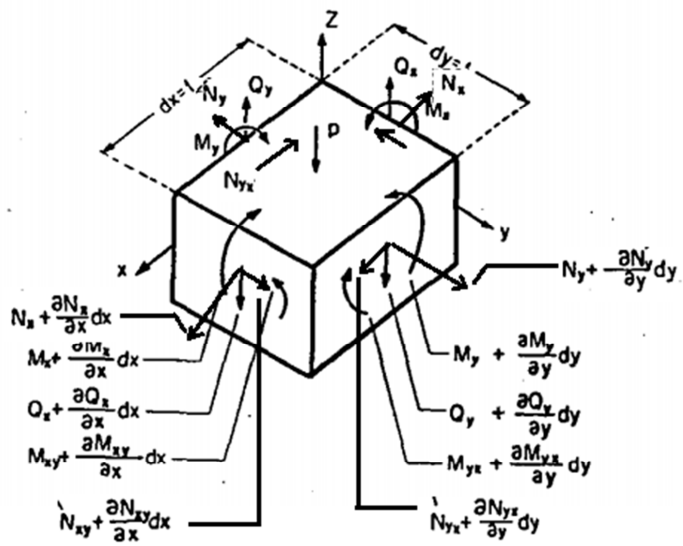



*Figure 1.12 : Equilibre d'un élément prismatique infiniment petit (Dubas ,1955)*

Avec les conventions de signe habituelles, l'équilibre des efforts normaux et de cisaillement et les charges dans le plan $\boldsymbol{xy}$ nous permet d'écrire :

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} - p_x = 0 \qquad \textit{(eq 1. 14)}$$

$$\frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} - p_y = 0 \qquad \textit{(eq 1. 15)}$$

L'équilibre des efforts tranchants et de la charge verticale s'exprime par la relation (équation 1.11):

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} - p_z = 0 \qquad \textit{(eq 1. 16)}$$

L'équilibre des moments et efforts tranchants est renseigné par les relations (eq 1.12 et 1.13) :

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} - Q_x = 0 \qquad \textit{(eq 1. 17)}$$

$$\frac{\partial M_y}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - Q_y = 0 \qquad \textit{(eq 1. 18)}$$

En regroupant les trois dernières équations, on obtient (équation 1.14) :

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2\frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = -p_z \qquad \textit{(eq 1. 19)}$$

### 3. Relation entre déformations et déplacements

L'état de déformation local s'exprime en fonction de l'état de déformation de membrane et de flexion au niveau du plan moyen compte tenu de la côte *z* du point considéré (Guitard, 1987). De ces relations (équations 1.15, 1.16, 1.17), on peut faire apparaitre les déformations généralisées associées aux efforts généralisés.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \varepsilon_x^0 + zk_x \qquad \textit{(eq 1. 20)}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \varepsilon_y^0 + zk_y \qquad \textit{(eq 1. 21)}$$

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = \gamma_{xy}^0 + zk_{xy} \qquad \textit{(eq 1. 22)}$$

Ces différentes termes permettent de renseigner des déformations de membrane et les courbures de flexion et torsion. Les courbures de flexion sont notées $\varepsilon_x^0$ , $\varepsilon_y^0$, $\gamma_{xy}^0$ et définies par :

- Elongation dans le plan moyen associée à $N_x$ ;

$$\varepsilon_x^0 = \frac{\partial u_0}{\partial x} \qquad \textit{(eq 1. 23)}$$

- Elongation dans le plan moyen associée à $N_y$ ;

$$\varepsilon_y^0 = \frac{\partial v_0}{\partial x} \qquad \textit{(eq 1. 24)}$$

- Distorsion dans le plan moyen associée à $N_{xy}$ ;

$$\gamma_{xy}^{0} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \qquad \textit{(eq 1. 25)}$$

Les courbures de flexion et de torsion notées $k_x$ , $k_y$ , $k_{xy}$ sont définies par :

- Courbure associée au moment fléchissant $M_x$ ;

$$k_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \qquad \textit{(eq 1. 26)}$$

- Courbure associée au moment fléchissant $M_y$ ;

$$k_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \qquad \textit{(eq 1. 27)}$$

- Torsion associée au moment de torsion $M_{xy}$ ;

$$k_{xy} = -2\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \qquad \textit{(eq 1. 28)}$$

## 4. Loi de comportement

Dans la suite, on notera :

$n$ : nombre de plis entrant dans la composition du contreplaqué (n est impair);

$e_k$ : épaisseur du k$^{\text{ième}}$ pli $(1 \leq k \leq n)$;

$z_k$ : côte du plan moyen du pli k comptée par rapport à celui du pli moyen;

D'après les équations $(I.17)$ à $(I.19)$**,** pour le pli k on a la relation **:**

$$\{\varepsilon\}_k = \{\varepsilon_0\}_k + z\{k\}_k \qquad \textit{(eq 1. 29)}$$

Soit $[Q]^{(k)} = \begin{bmatrix} Q_{11}^{(k)} & Q_{12}^{(k)} & Q_{66}^{(k)} \\ Q_{21}^{(k)} & Q_{22}^{(k)} & Q_{66}^{(k)} \\ Q_{61}^{(k)} & Q_{62}^{(k)} & Q_{66}^{(k)} \end{bmatrix}$ la matrice des caractéristiques élastiques du pli k sous l'hypothèse des contraintes planes. Elle dépend de l'essence de bois utilisé (Guitard et El Amri, 1987).

En multipliant membre à membre (I.24) par $[Q]^{(k)}$ , on obtient :

$$\{\sigma\}_k = [Q]^{(k)}\{\varepsilon\}_k = [Q]^{(k)}\{\varepsilon_0\}_k + z[Q]^{(k)}\{k\}_k \qquad \textit{(eq 1. 30)}$$

La loi de comportement élastique des panneaux de contreplaqué découle de la relation $(I.21)$**.** En effet, en intégrant $(I.25)$ sur tout le stratifié, on obtient:

$$\{N\} = \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-e/2}^{e/2} \{\sigma\}_k \, dz = \int_{-e/2}^{e/2} [Q]^{(k)}\{\varepsilon_0\}_k \, dz + \int_{-e/2}^{e/2} z[Q]^{(k)}\{k\}_k \, dz$$

En d'autres termes :

$$\{N\} = [A]\{\varepsilon_0\} + [B]\{k\} \qquad \textit{(eq 1. 31)}$$

Par ailleurs :

$$\{M\} = \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-e/2}^{e/2} z\{\sigma\}\, dz = \int_{-e/2}^{e/2} z[Q]^{(k)}\{\varepsilon_0\}_k\, dz + \int_{-e/2}^{e/2} z^2[Q]^{(k)}\,\{k\}dz$$

Soit :

$$\{M\} = [B]\{\varepsilon_0\} + [D]\{k\} \qquad \textit{(eq 1. 32)}$$

Le couplage des deux équations précédentes permet d'écrire la loi de comportement élastique d'un panneau de contreplaqué (Guitard, 1987) :

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} & B_{61} & B_{62} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} & D_{61} & D_{62} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \qquad \textit{(eq 1. 33)}$$

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = [E]\begin{Bmatrix} \varepsilon \\ k \end{Bmatrix} \Leftrightarrow \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ k \end{Bmatrix} = [S]\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} \qquad \textit{(eq 1. 34)}$$

Avec :

- $[E]$: matrice de rigidité du panneau de contreplaqué ;
- $[S]$: matrice de souplesse du panneau de contreplaqué ;

$$[S] = [E]^{-1} \qquad \textit{(eq 1. 35)}$$

- $A_{ij}$ avec $i, j \in (1,2,6)$ sont les rigidités de membrane ;

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{n} Q_{ij}^{(k)} e_k \quad avec\ e_k : l'épaisseur d'un\ pli \qquad \textit{(eq 1. 36)}$$

- $D_{ij}$ avec $i, j \in (1,2,6)$ sont les rigidités de flexion-torsion ;

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^{n} Q_{ij}^{(k)} (z_k^2 e_k + e_k^3/12) \qquad \textit{(eq 1. 37)}$$

- $B_{ij} = \sum_{k=1}^{n} Q_{ij}^{(k)} z_k e_k$ avec $i, j \in (1,2,6)$ sont les rigidités de couplage entre les effets de membrane et les effets de flexion-torsion ;

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^{n} Q_{ij}^{(k)} z_k e_k \qquad \textit{(eq 1. 38)}$$

De même, on définit les constantes $A'_{ij}$ , $B'_{ij}$ et $D'_{ij}$ , $i, j \in (1,2,6)$ qui sont respectivement les souplesses de membrane, de couplage et de flexion-torsion.

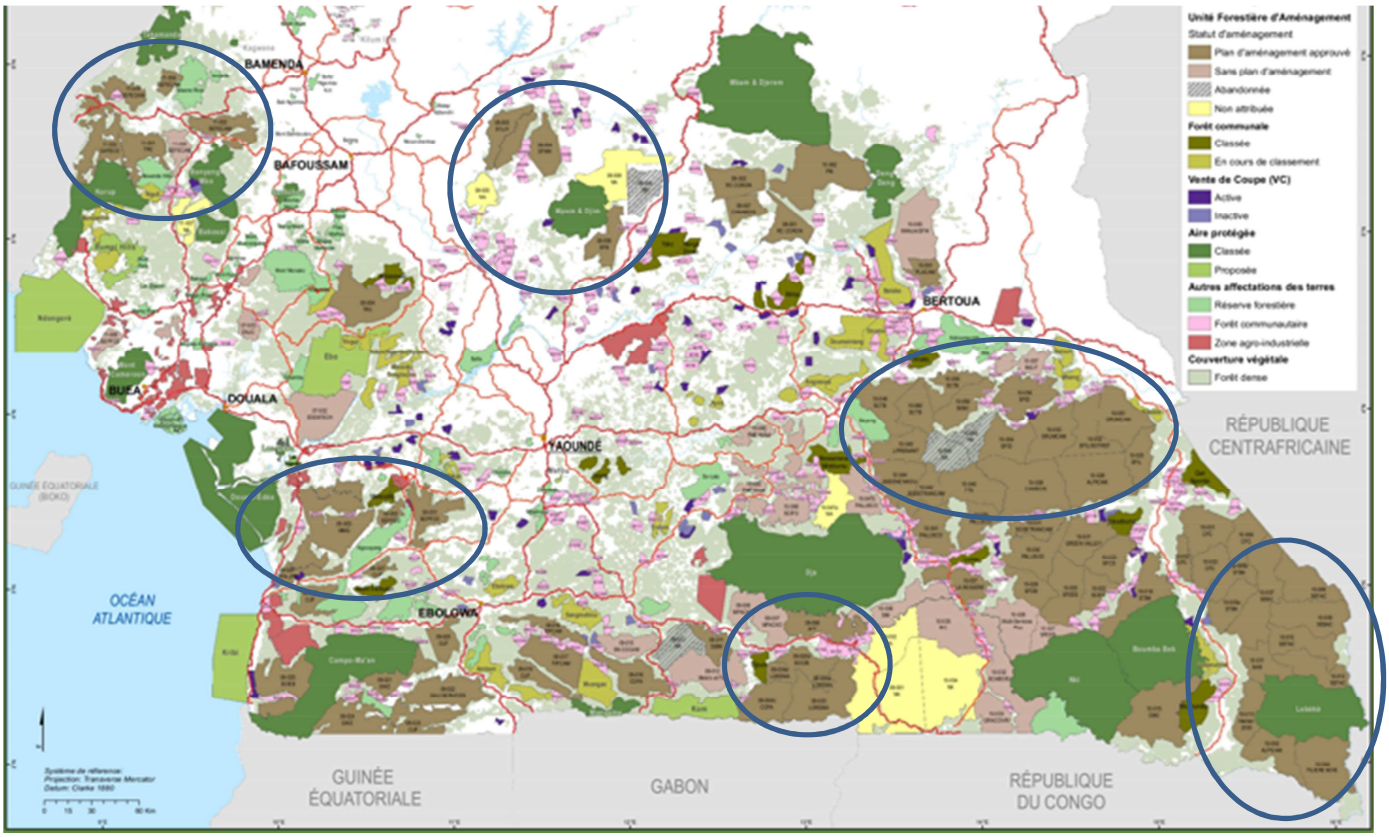
Plusieurs grandeurs techniques et technologiques se déduisent de la matrice de souplesse. On peut citer les modules d'élasticité apparents $E_{ij}$ définis par (Bos, 1995) :

$$E_{ij} = \frac{12}{e^3 D'_{ij}} \quad i,j \in (1,2,6) \qquad \textit{(eq 1. 39)}$$

Ces modules d'élasticité apparents $E_{ij}$ et rigidités ont les significations suivantes :

- $\boldsymbol{E_{11}}$ $(respectivement\ \boldsymbol{D_{11}}, \boldsymbol{D'_{11}})$: module (respectivement rigidité, souplesse) de flexion longitudinale ;
- $\boldsymbol{E_{22}}$ $(respectivement\ \boldsymbol{D_{22}}, \boldsymbol{D'_{22}})$: module (respectivement rigidité, souplesse) de flexion transversale ;
- $\boldsymbol{E_{66}}$ $(respectivement\ \boldsymbol{D_{66}}, \boldsymbol{D'_{66}})$: : module (respectivement rigidité, souplesse) de torsion ;
- $\boldsymbol{E_{ij}}$ $\left(respectivement\ \boldsymbol{D_{ij}}, \boldsymbol{D'_{ij}}, \boldsymbol{i \neq j}\right)$ : module de couplage flexion-torsion.

## Annexe 2.1 : Indication des plans d'amenagement exploités pour l'étude multicritère du choix des essences pour la fabrication des Contreplaqués. (Plans approuvés du domaine forestier du Cameroun 2012.)



## Annexe 2.2 : Essences exploitées ou recensés dans quarante-cinq (45) plans d'aménagement représentatifs des concessions forestières au cameroun.

| N0° | **Nom Commercial** | **Nom scientifique** |
|---|---|---|
| 1 | Abale | |
| 2 | Abam à poils rouges | *Gambeya africana* |
| 3 | Abam évélé | |
| 4 | Abam fruit jaune | |
| 5 | Abam vrai | |
| 6 | Abip ele | |
| 7 | Abura/Bahia | *Fleroya lerdermannii* |
| 8 | Acajou à grandes folioles | *Khaya grandifoliola* |
| 9 | Acajou blanc | *khaya anthotheca* |
| 10 | Acajou de bassam/Ngollon | *khaya ivorensis* |
| 11 | Agba / Tola | *Gossweilerodendron balsamiferum* |
| 12 | Aiélé / Abel | *Canarium schweinfurthii* |
| 13 | Akela a fleur rouge | |
| 14 | Ako / Aloa | *Antiaris africana* |
| 15 | Ako W | *Antiaris welwitschii* |
| 16 | Alep | *Desbordesia glaucescens* |
| 17 | Andoung brun | *Monopetalanthus letestui* |
| 18 | Andoung rose | *Monopetalanthus microphyllus* |
| 19 | Angakomo | |
| 20 | Angossa | |
| 21 | Angueuk | *ongekeo gore* |
| 22 | Aningré A | *Aningeria altissima* |
| 23 | Aningré R | *Aningeria Robusta* |
| 24 | Assamela / Afromosia | *Pericopsis elata* |
| 25 | Avodire | *Turraeanthus africanus* |
| 26 | Awoura/Ekop beli | *Paraberlinia bifoliolata* |
| 27 | Ayous/Obéché | *Triplochyton scleroxylon* |
| 28 | Azobé/Bongossi | *Lophira alata* |
| 29 | Bahia/Abura | *Mitragyna ciliata* |
| 30 | Bazoa | |
| 31 | Bété / Mansonia | *Mansonia altissima* |
| 32 | Bilinga | *Nauclea diderrichii* |
| 33 | Bodioa | *Anopyxis klaineana* |
| 34 | Bongo H / Olon | *Fagara heitzii* |
| 35 | Bossé clair | *Guarea cedrata* |
| 36 | Bossé foncé | *Guarea thompsonii* |
| 37 | Bubinga E/Ovengkol | *Guibourtia demeusi* |
| 38 | Bubinga rouge | *Guibourtia tessmannii* |
| 39 | Dabéma / Atui | *Piptadeniastrum africanum* |

| N0° | **Nom Commercial** | **Nom scientifique** |
|---|---|---|
| 40 | Dambala | |
| 41 | Diana parallele | *Celtis adolf-friderci* |
| 42 | Diana T | *CeltisTessmannii* |
| 43 | Diana Z | *Celtis Zenkeri* |
| 44 | Dibétou / Bibolo | *Lovoa trichilioides* |
| 45 | Difou | *Morus mesozygia* |
| 46 | Doussié blanc/Pachyloba | *Afzelia pachyloba* |
| 47 | Doussié rouge | *Afzelia bipindensis* |
| 48 | Doussié sanaga | |
| 49 | Eben | |
| 50 | Ebiara yaoundé/Abem | *Berlina grandifolia* |
| 51 | Ebom | |
| 52 | Ekaba | *Tetraberlina bifoliolata* |
| 53 | Ekop léké | |
| 54 | Ekop naga akolodo | |
| 55 | Ekop naga Nord ouest | |
| 56 | Ekop Ngombé gf | |
| 57 | Ekop Ngombé mamelle | *Didelotia africana* |
| 58 | Ekouné | *Coelocaryon preussi* |
| 59 | Emien | *Alstonia boonei* |
| 60 | Etimoe | *Copaifera mildbraedii* |
| 61 | Eveuss / Ngon | *Klainedoxa Gabonensis* |
| 62 | Eyek | *Fillaeapsis discophora* |
| 63 | Eyok | |
| 64 | Eyong | *Eribroma oblongum* |
| 65 | Faro | |
| 66 | Faro mezili | *Danielle klainei* |
| 67 | Fraké / Limba | *Terminalia superba* |
| 68 | Framiré | *Terminalia ivorensis* |
| 69 | Fromager/seba | *Ceiba pentandra* |
| 70 | Gombé | *Toubaouate brevipaniculata* |
| 71 | Iatandza / Evouvouss | *Albizia ferruginea* |
| 72 | Igaganga/Assa Mingoung | *Dacryodes igaganga* |
| 73 | Ilomba | *Pycnanthus angolensis* |
| 74 | Iroko | *Milicia excelsa* |
| 75 | kekele | |
| 76 | Kondroti | *Rhodognaphalon brevicuspe* |
| 77 | Kossipo / Kosipo | *Entandrophragma candollei* |
| 78 | Kotibé | *Nesogordonia papaverifera* |
| 79 | Koto | *Pterygota macrocarpa* |
| 80 | kumbi | |

| N0° | **Nom Commercial** | **Nom scientifique** |
|---|---|---|
| 81 | Landa | *Erythroxylum mannii* |
| 82 | Lati / Edjil | *Amphimas ferrugineus* |
| 83 | Lati parallèle | *Amphimas pterocapoides* |
| 84 | Limbali | *Gilbertiodendron dewevrei* |
| 85 | Longhi / Abam | *Gambeya africana* |
| 86 | Lotofa / Nkanang | *Sterculia rhinopetala* |
| 87 | Makoré/Douka | *Tleghemella heckelli* |
| 88 | Mambodé/Amouk | *Detarium macrocarpum* |
| 89 | Moabi | *Baillonelle toxisperma* |
| 90 | Movingui | *Distemonanthus benthamianus* |
| 91 | Mubala | |
| 92 | Mukulungu | *Austranella congolensis* |
| 93 | Mutondo | |
| 94 | Naga / Ekop Naga | *Brachystegia cynometroides* |
| 95 | Naga parallèle | *Brachystegia eurycoma* |
| 96 | Nganga | |
| 97 | Niové | *Staudtia kamerunensis* |
| 98 | Oboto / Abotzok | *Mammea africana* |
| 99 | Odouma | |
| 100 | Okan / Adoum | *Cylicodiscus gabonensis* |
| 101 | Okoume | *Aucoume klaineana* |
| 102 | Omang bikodok | |
| 103 | Onzabili K /Angongui | *Antrocaryon klaineanum* |
| 104 | Onzabili M /Angongui | *Antrocaryon micraster* |
| 105 | Osanga | *Pteleopsis hylodendron* |
| 106 | Ovoga / Angalé | *Poga oleosa* |
| 107 | Ozigo | *Dcryodes buettneri* |
| 108 | Padouk blanc | *Pterocarpus mildbraedii* |
| 109 | Padouk rouge | *Pterocarpus soyauxii* |
| 110 | Pao rosa | *zwartzia fistuloides* |
| 111 | Saliyemo/Banbaye | |
| 112 | Sapelli | *Entandrophragma cylindricum* |
| 113 | Sipo | *Entandrophragma utile* |
| 114 | Tali | *Erythropleum ivorense* |
| 115 | Tchitola | *Oxystigma oxyphyllum* |
| 116 | Tiama | *Entandrophragma angolense* |
| 117 | Tiama Congo | *Entandrophragma angolense* |
| 118 | Tola | *Gossweilerodendron balsamiferum* |
| 119 | Wengé | *Milletia laurentii* |
| 120 | Yungu | |
| 121 | Zingana / Amuk | *Microberlinia bisulcata* |

## Annexe 2.3 :. Stratégies de pondération multicritère et procedure de surclassement

La technique d'agrégation ELECTRE III est fondée sur la comparaison par paire d'actions *a* et *b*. Une action dans notre contexte désigne une essence de bois donnée. En ce qui concerne ELECTRE TRI, il est question de comparer une essence de bois *x* à une essence fictive *y* dont les performances sont identiques pour chaque critère. L'objectif est d'établir dans chaque cas si la relation de surclassement *S* est globalement vérifiée pour un couple d'action. Pour cela, on va conférer à chacun des critères $C_i$, deux pouvoirs :

- **un pouvoir de vote en faveur du surclassement global de *b* par *a*** : il est noté $k_i$ et fixé pour chaque critère $C_i$. **La « voix » ainsi exprimée par le critère sera pondérée par une valeur qui représentera l'importance relative que les décideurs apportent à ce critère par rapport à tous les autres critères.** L'ensemble des valeurs correspondantes à chacun des 12 critères retenus dans ce travail est le principal déterminant d'une stratégie de choix. En fonction du jeu de valeurs retenu, un critère ne pourra pas forcément imposer le surclassement à lui seul. A chacune des 5 stratégies A, B, C, D et E envisagées dans ce travail, correspond une construction possible du jeu de valeurs des ki (tableau 2.18 de la page 62). Il apparaît donc que le pouvoir de vote est identique pour chaque critère dans le cas de la stratégie A. Dans les autres cas, ce pouvoir a été maximisé en ce qui concerne le volume exploitable et le statut de conservation. **La construction de ces stratégies est essentiellement intuitive dans ce travail**. L'intérêt de cet exercice est de se rapprocher au mieux d'une stratégie permmettant d'effectuer un choix suffisamment raisonné des essences de bois, permettant de mieux valoriser la ressource ligneuse tout en préservant les espèces de bois menacées.

- **un pouvoir de véto contre le surclassement**. Sur un critère, il s'exprime par un seuil de veto traduisant la différence maximale des performances pour laquelle le surclassement de *b* par *a* est refusé et cela quelles que soient les performances sur les autres critères. Ce seuil a été fixé à 6 dans ce travail et conféré à chaque critère. Le pouvoir de véto permet cependant à un critère qui en est doté de s'opposer à lui seul au surclassement, c'est-à-dire de s'opposer à l'assertion «*a* est au moins aussi bon que *b*».

Lors de la comparaison globale (ou multicritère) de deux actions *a* et *b*, les méthodes de type ELECTRE s'intéressent à la question du surclassement (*a S b*), c'est- à-dire à la question « l'action *a* est-elle globalement au moins aussi bonne que l'action *b* ?». Cette question est « posée » à chacun des critères, qui va choisir de voter pour ou contre cette assertion. On considèrera finalement (*a S b*) comme vérifié globalement si une « majorité » des critères a voté en ce sens. Mais une seconde condition pour accepter (*a S b*) est qu'aucun des critères parmi ceux n'ayant pas voté pour l'établissement de (*a S b*) ne s'oppose trop fortement à la majorité et apporte son veto.

Pour la comparaison globale de l'action *a* avec l'action *b*, chaque critère $C_i$ de la est finalement muni de :

- la fonction $\varphi_i$ (*a* $S_{Ci}$ *b*) à valeurs dans {0,1} ;
- un poids $k_i$ reflétant son pouvoir de vote ;
- un seuil $v_i$ (fixé à 6) lui conférant un pouvoir de veto au surclassement global.

La fonction $\varphi_i$ *(a* $S_{Ci}$ *b)* représente le degré avec lequel l'assertion « *a* surclasse *b* » est vraie pour le critère $C_i$. Elle est généralement définie de la manière suivante :

- ***$\varphi_i$ vaut 1 si le critère Ci supporte totalement l'assertion a $S_{Ci}$ b***. *En d'autres termes, l'action a est fortement préférée à b, ce qui se traduit par la relation :*

$$g_i(a) > g_i(b) - q_j(b)$$

$g_j$ (a) et $g_j$(b) désignent respectivement les performances des actions a et b pour le critère Cj ; $q_j$ est le seuil d'indifférence pour le critère j, fixé à 0 dans cette thèse.

- ***$\varphi_i$ vaut 0 si le critère Ci ne supporte pas l'assertion a $S_{Ci}$ b.*** *L'action b est alors fortement préférée à a, ce qui se traduit par :*

$$g_j(a) \leq g_j(b) - p_j(b)$$

$p_j$ est le seuil de préférence pour le critère j, fixé à 1 dans cette thèse.

- ***$\varphi_i$ prend une valeur intermédiaire entre 0 et 1, définie par la relation***

$$c_j(a,b) = \frac{p_j(b) - (g_j(b) - g_j(a))}{p_j(b) - q_j(b)}$$

$$\textbf{si } \boldsymbol{g_j(b) - p_j(b) < g_j(a) \leq g_j(b) - p_j(b)}$$

Dans le but de prendre en compte les votes des critères et les éventuels vetos, deux indices sont définis :

- l'indice de concordance noté *c (a, b)* de la famille de critères Ci ;
- l'indice de discordance d'un critère Ci noté $d_i$ (*a*,*b*).

$$c(a,b) = \frac{\sum \varphi_i(aS_{Ci}b)k_i}{\sum k_i}$$

Le numérateur représente la somme des poids des critères votant pour l'établissement du surclassement, poids éventuellement affaiblis par le facteur φi (*a* $S_{Ci}$ *b*) quand il y a préférence faible pour *b*, annulé par ce même facteur quand il y a préférence stricte pour b. Le dénominateur est la somme des poids des critères. On obtient donc par ce rapport un nombre compris entre 0 et 1 représentant la coalition de critères votant pour le surclassement de *a* par *b*.

L'indice de discordance est défini de la façon suivante :

- $d_i$ (*a*,*b*) = 1 si $g_i(b) > g_i(a)+v_i(a)$

- $d_i$ (*a*,*b*) =0 si $g_i(b) \leq g_i(a)+p_i(a)$

- $d_i$ (*a*,*b*) = $(g_i(b) - g_i(a) - p_i(a)) / (v_i(a) - p_i(a))$ sinon.

Il représente le degré avec lequel un critère s'oppose à l'établissement du surclassement global (a S b). $v_i$ (*a*) est le seuil de véto pour le critère i, fixé à 6.

Alors, pour la comparaison de deux actions a et b, la proposition (a S b) est vérifiée si et seulement si la condition suivante est réalisée :

$$\boldsymbol{\sigma(a,b) \geq \lambda,\ 0 \leq \lambda \leq 1}.$$

La fonction σ est l'indice de crédibilité de la proposition (a S b) utilisé dans les techniques ELECTRE III et ELECTRE TRI-B et défini de la façon suivante :

$$\sigma(a,b) = c(a,b) \qquad si\ \overline{F(a,b)} = \emptyset$$

$$\sigma(a,b) = c(a,b) \prod_{j/C_j \epsilon F} \frac{1 - d_j(a,b)}{1 - c(a,b)} \;\; si \; \overline{F(a,b)} = \emptyset$$

Avec :

- F : ensemble des critères Ci ;
- $\overline{F}\,(a,b) = \{C_j \in F \,|\, d_j(a,b) > C(a,b)\}$.

Le terme « produit » apparaissant dans la définition de σ n'est là que pour éventuellement diminuer c (b, a) en cas de veto. En effet, l'ensemble des critères pouvant exercé un pouvoir de veto est l'ensemble $\overline{F}$ (ses éléments sont les critères pour lesquels l'indice de discordance est supérieur à l'indice de concordance de la famille F). Un indice de discordance de valeur 1 annule systématiquement σ. Un critère gi dont l'indice de discordance est compris entre c(a,b) et 1, diminue σ en le multipliant par le rapport $(1-d_i\,(a,b))/(1-c(a,b))$. En conséquence $c(b, a) \geq \sigma\,(b, a)$. On peut donc en déduire (en utilisant la condition $\sigma\,(b, a) \geq \lambda$) que $c(b,a) \geq \lambda$. Autrement dit, une première condition nécessaire au surclassement est que le pourcentage des votes allant pour l'établissement du surclassement (pourcentage représenté par l'indice de concordance c(b,a)) soit supérieur ou égal à λ. Dans Electre, le nombre λ est un paramètre du modèle compris aussi entre 0 et 1. Il est appelé seuil de coupe et prend ses valeurs généralement entre 0,5 et 1. La valeur de 0,67 est régulièrement utilisée. Fixer par exemple le paramètre λ à 0,7 revient à exiger au moins 70% des votes qui soient favorables au surclassement (votes des critères de la famille F, pondérations prises en compte). Ce paramètre représente finalement la sévérité que le décideur impose au modèle pour fournir un résultat agrégé. Plus λ est proche de 1 plus la sévérité est grande. Mais cette première condition n'est pas suffisante. La seconde condition est que le terme « produit » multiplié à c(a,b) ne diminue pas la valeur de σ en dessous de la valeur de λ, c'est-à-dire qu'aucun critère ne s'oppose trop fortement à l'établissement du surclassement (a S b).

## Annexe 2.4 Hiérarchisation catégorielle des essences de bois pour un usage en classe 1

| Catégories | StratégieA | StratégieB | StratégieC | StratégieD | StratégieE |
|---|---|---|---|---|---|
| Elevé | Aningre A, Ayous, Bete, Bomanga, Dabema, Diana Z, Ebiara yde, Fromager, Gombe, Ilomba, Kanda, Limbali, Lotofa, Longhi, Mambode, Niove, Onzabili K Oboto, | Aningre A, Ayous, Bete, Bomanga, Dabema, Diana Z, Ebiara yde, Fromager, Gombe, Ilomba, Kanda, Limbali, Lotofa, Longhi, Mambode, Niove, Onzabili K | Aningre A, Ayous, Bete, Bomanga, Dabema, Diana Z, Ebiara yde, Ekaba, Fromager, Gombe, Ilomba, Kanda, Limbali, Lotofa, Longhi, Mambode, Niove, Onzabili K | Aningre A, Ayous, Bete, Bomanga, Dabema, Diana Z, Ebiara yde, Fromager, Gombe, Ilomba, Kanda, Limbali, Lotofa, Longhi, Mambode, Niove, Onzabili K | Aningre A, Ayous, Bete, Bomanga, Dabema, Diana Z, Ebiara yde, Fromager, Gombe, Ilomba, Kanda, Limbali, Lotofa, Longhi, Mambode, Niove, |
| Moyen | Angueuk, Awoura, Bongo H, Ekaba, Etimoe, Eveuss, Eyong, Frake, Landa, Movingui, Tali | Angueuk, Awoura, Bongo H, Ekaba, Etimoe, Eveuss, Eyong, Frake, Landa, Movingui, Oboto, Tali | Angueuk, Awoura, Assamela, Bongo H, Difou, Etimoe, Eveuss, Eyong, Frake, Landa, Movingui, Oboto, Tali | Angueuk, Awoura, Bongo H, Difou, Ekaba, Etimoe, Eveuss, Eyong, Frake, Landa, Movingui, Oboto, Tali | Angueuk, Awoura, Bongo H, Difou, Ekaba, Etimoe, Eveuss, Eyong, Frake, Landa, Movingui, Oboto, Onzabili K, Tali |
| Faible | Abale, Abura, Acajou blanc, Afok ahie, Aiélé / Abel, Ako, Akossika, Alep, Andoung brun, Assamela, Avodire, Azobe, Bilinga, Bodioa, Bosse fonce, Bubinga E, Dibetou, Difou, Doussie blanc, Eben, Ekoune, Emien, Faro mezili, Framire, Iatanza, Igaganga, Iroko, Izombe, kekele, Kondroti, Kossipo, Kotibe, Koto, Lati, Makore, Moabi, Mukulungu, Naga, Nieuk, Okan, Okoume, Osanga, Ovoga, Ozigo, Padouk rouge, Pao rosa, Sapelli, Sipo, Tchitola, Tiama, Tola, Wenge | Abale, Abura, Acajou blanc, Afok ahie, Aiélé / Abel, Ako, Akossika, Alep, Andoung brun, Assamela, Avodire, Azobe, Bilinga, Bodioa, Bosse fonce, Bubinga E, Dibetou, Difou, Doussie blanc, Eben, Ekoune, Emien, Faro mezili, Framire, Iatanza, Igaganga, Iroko, Izombe, kekele, Kondroti, Kossipo, Kotibe, Koto, Lati, Makore, Moabi, Mukulungu, Naga, Nieuk, Okan, Okoume, Osanga, Ovoga, Ozigo, Padouk rouge, Pao rosa, Sapelli, Sipo, Tchitola, Tiama, Tola, Wenge | Abale, Abura, Acajou blanc, Afok ahie, Aiélé / Abel, Ako, Akossika, Alep, Andoung brun, Avodire, Azobe, Bilinga, Bodioa, Bosse fonce, Bubinga E, Dibetou, Doussie blanc, Eben, Ekoune, Emien, Faro mezili, Framire, Iatanza, Igaganga, Iroko, Izombe, kekele, Kondroti, Kossipo, Kotibe,Koto, Lati, Makore, Moabi, Mukulungu, Naga, Nieuk, Okan, Okoume, Osanga, Ovoga, Ozigo, Padouk rouge, Pao rosa, Sapelli, Sipo, Tchitola, Tiama, Tola, Wenge | Abale, Abura, Acajou blanc, Afok ahie, Aiélé / Abel, Ako, Akossika, Alep, Andoung brun, Assamela, Avodire, Azobe, Bilinga, Bodioa, Bosse fonce, Bubinga E, Dibetou, Doussie blanc, Eben, Ekoune, Emien, Faro mezili, Framire, Iatanza, Igaganga, Iroko, Izombe, kekele, Kondroti, Kossipo, Kotibe,Koto, Lati, Makore, Moabi, Mukulungu, Naga, Nieuk, Okan, Okoume, Osanga, Ovoga, Ozigo, Padouk rouge, Pao rosa, Sapelli, Sipo, Tchitola, Tiama, Tola, Wenge | Abale, Abura, Acajou blanc, Afok ahie, Aiélé / Abel, Ako, Akossika, Alep, Andoung brun, Assamela, Avodire, Azobe, Bilinga, Bodioa, Bosse fonce, Bubinga E, Dibetou, Doussie blanc, Eben, Ekoune, Emien, Faro mezili, Framire, Iatanza, Igaganga, Iroko, Izombe, kekele, Kondroti, Kossipo, Kotibe,Koto, Lati, Makore, Moabi, Mukulungu, Naga, Nieuk, Okan, Okoume, Osanga, Ovoga, Ozigo, Padouk rouge, Pao rosa, Sapelli, Sipo, Tchitola, Tiama, Tola, Wenge |

## Annexe 2.5 : Hiérarchisation catégorielle des essences de bois pour un usage en classe 2

| Catégories | Stratégie A | Stratégie B | Stratégie C | Stratégie D | Stratégie E |
|---|---|---|---|---|---|
| Elevé | Bete, Bomanga, Dabema, Ebiara yde, Kanda, Limbali, Lotofa, Mambode | Bete, Bomanga, Dabema, Ebiara yde, Kanda, Limbali, Lotofa, Mambode, | Bete, Bomanga, Dabema, Ebiara yde, Ekaba, Kanda, Limbali, Lotofa, Mambode | Bete, Bomanga, Dabema, Ebiara yde, Kanda, Limbali, Lotofa, Mambode | Bete, Bomanga, Bongo H, Dabema, Difou, Ebiara yde, Kanda, Limbali, Mambode |
| Moyen | Angueuk, Awoura, Bilinga, Bongo H, Difou Doussie blanc, Ekaba, Niove, Landa, Longhi, Movingui Oboto | Angueuk, Awoura Bongo H, Ekaba, Niove, Landa, Longhi, Movingui Oboto | Angueuk, Awoura Bongo H, Difou Eveuss, Niove, Landa, Longhi, Movingui, Oboto | Angueuk, Awoura Bongo H, Difou, Ekaba, Niove, Landa, Longhi, Movingui Oboto | Angueuk, Awoura Ekaba, Niove, Landa, Longhi, Lotofa, Movingui Oboto |
| Faible | Abale, Abura, Acajou blanc, Afok ahie, Aiélé / Abel, Ako, Akossika, Alep, Andoung brun, Aningre A, Assamela, Avodire, Ayous, Azobe, Bodioa, Bosse fonce, Bubinga E, Diana Z, Dibetou, Eben, Ekoune, Emien, Etimoe, Eveuss, Eyong, Faro mezili, Frake, Framire, Fromager, Gombe, Iatanza, Igaganga, Ilomba, Iroko, Izombe, kekele, Kondroti, Kossipo, Kotibe, Koto, Lati, Makore, Moabi, Mukulungu, Naga, Nieuk, Okan, Okoume, Onzabili K, Osanga, Ovoga, Ozigo, Padouk rouge, Pao rosa, Sapelli, Sipo, Tali, Tchitola, Tiama, Tola, Wenge | Abale, Abura, Acajou blanc, Afok ahie, Aiélé / Abel, Ako, Akossika, Alep, Andoung brun, Aningre A, Assamela, Avodire, Ayous, Azobe, Bilinga, Bodioa, Bosse fonce, Bubinga E, Diana Z, Dibetou, Difou, Doussie blanc, Eben, Ekoune, Emien, Etimoe, Eveuss, Eyong, Faro mezili, Frake, Framire, Fromager, Gombe, Iatanza, Igaganga, Ilomba, Iroko, Izombe, kekele, Kondroti, Kossipo, Kotibe, Koto, Lati, Makore, Moabi, Mukulungu, Naga, Nieuk, Okan, Okoume, Onzabili K, Osanga, Ovoga, Ozigo, Padouk rouge, Pao rosa, Sapelli, Sipo, Tali, Tchitola, Tiama, Tola, Wenge | Abale, Abura, Acajou blanc, Afok ahie, Aiélé / Abel, Ako, Akossika, Alep, Andoung brun, Aningre A, Assamela, Avodire, Ayous, Azobe, Bilinga, Bodioa, Bosse fonce, Bubinga E, Diana Z, Dibetou, Doussie blanc, Eben, Ekoune, Emien, Etimoe, Eyong, Faro mezili, Frake, Framire, Fromager, Gombe, Iatanza, Igaganga, Ilomba, Iroko, Izombe, kekele, Kondroti, Kossipo, Kotibe, Koto, Lati, Makore, Moabi, Mukulungu, Naga, Nieuk, Okan, Okoume, Onzabili K, Osanga, Ovoga, Ozigo, Padouk rouge, Pao rosa, Sapelli, Sipo, Tali, Tchitola, Tiama, Tola, Wenge | Abale, Abura, Acajou blanc, Afok ahie, Aiélé / Abel, Ako, Akossika, Alep, Andoung brun, Aningre A, Assamela, Avodire, Ayous, Azobe, Bilinga, Bodioa, Bosse fonce, Bubinga E, Diana Z, Dibetou, Doussie blanc, Eben, Ekoune, Emien, Etimoe, Eveuss, Eyong, Faro mezili, Frake, Framire, Fromager, Gombe, Iatanza, Igaganga, Ilomba, Iroko, Izombe, kekele, Kondroti, Kossipo, Kotibe, Koto, Lati, Makore, Moabi, Mukulungu, Naga, Nieuk, Okan, Okoume, Onzabili K, Osanga, Ovoga, Ozigo, Padouk rouge, Pao rosa, Sapelli, Sipo, Tali, Tchitola, Tiama, Tola, Wenge | Abale, Abura, Acajou blanc, Afok ahie, Aiélé / Abel, Ako, Akossika, Alep, Andoung brun, Aningre A, Assamela, Avodire, Ayous, Azobe, Bilinga, Bodioa, Bosse fonce, Bubinga E, Diana Z, Dibetou, Doussie blanc, Eben, Ekoune, Emien, Etimoe, Eveuss, Eyong, Faro mezili, Frake, Framire, Fromager, Gombe, Iatanza, Igaganga, Ilomba, Iroko, Izombe, kekele, Kondroti, Kossipo, Kotibe, Koto, Lati, Makore, Moabi, Mukulungu, Naga, Nieuk, Okan, Okoume, Onzabili K, Osanga, Ovoga, Ozigo, Padouk rouge, Pao rosa, Sapelli, Sipo, Tali, Tchitola, Tiama, Tola, Wenge |

## Annexe 2.6 : Hiérarchisation catégorielle des essences de bois pour un usage en classe 3

| Catégories | StratégieA | StratégieB | StratégieC | StratégieD | StratégieE |
|---|---|---|---|---|---|
| Elevé | Bete, Kanda, Limbali; Lotofa | Bete, Kanda, Limbali; Lotofa, | Bete, Kanda, Limbali; Lotofa, Ekaba | Bete, Kanda, Limbali; Lotofa, | Bete, Difou, Kanda, Limbali, Bongo H. |
| Moyen | Angueuk, Bomanga, Bongo H Bilinga, Dabema, Difou, Doussie blanc, Ebiara yde, Ekaba, Mambode, Movingui, Niové, 0boto, Mambode | Bomanga, Bongo H Dabema, Ebiara yde, Longhi, Mambode, Movingui, Niové, 0boto, Mambode | Angueuk,Bomanga, Bongo H Dabema, Difou, Ebiara yde, Longhi, Mambode, Movingui, Niové, 0boto, Mambode | Angueuk, Bomanga, Bongo H, Dabema, Difou, Ebiara yde, Ekaba, Mambode, Movingui, Niové, 0boto, Mambode, | Angueuk, Bomanga, Bongo H Dabema, Ebiara yde, Ekaba, ; Lotofa, Longhi, Mambode, Movingui, Niové, 0boto, Mambode, |
| Faible | Abale, Abura, Acajou blanc ; Afok ahie, Aiélé/Abel; Ako, Akossika, Alep, Andoung brun, Aningre A, Assamela, Avodire, Awoura, Ayous, Azobe, Bodioa, Bosse fonce, Bubinga E, Diana Z, Dibetou, Doussie blanc, Eben, Ekaba, Ekoune, Emien, Etimoe, Eveuss, Eyong, Faro mezili, Frake, Framire, Fromager, Gombe, Iatanza, Igaganga, Ilomba, Iroko, Izombe, kekele, Kondroti, Kossipo, Kotibe, Koto, Lati, Longhi, Makore, Moabi, Movingui, Mukulungu, Naga, Nieuk, Okan, Okoume, Onzabili K, Osanga, Ovoga, Ozigo, Padouk rouge, Pao rosa, Sapelli, Sipo, Tali, Tchitola, Tiama, Tola, Wenge , Zingana | Abale, Abura, Acajou blanc ; Afok ahie, Aiélé/Abel; Ako, Akossika, Alep, Andoung brun, Aningre A, Angueuk, Assamela, Avodire, Awoura, Ayous, Azobe, Bilinga, Bodioa, Bosse fonce, Bubinga E, Diana Z, Dibetou, Difou, Doussie blanc, Eben, Ekaba, Ekoune, Emien, Etimoe, Eveuss, Eyong, Faro mezili, Frake, Framire, Fromager, Gombe, Iatanza, Igaganga, Ilomba, Iroko, Izombe, kekele, Kondroti, Kossipo, Kotibe, Koto, Lati, Makore, Moabi, Movingui, Mukulungu, Naga, Nieuk, Okan, Okoume, Onzabili K, Osanga, Ovoga, Ozigo, Padouk rouge, Pao rosa, Sapelli, Sipo, Tali, Tchitola, Tiama, Tola, Wenge , Zingana | Abale, Abura, Acajou blanc ; Afok ahie, Aiélé/Abel; Ako, Akossika, Alep, Andoung brun, Aningre A, Assamela, Avodire, Awoura, Ayous, Azobe, Bilinga, Bodioa, Bosse fonce, Bubinga E, Diana Z, Dibetou, Doussie blanc, Eben, Ekaba, Ekoune, Emien, Etimoe, Eveuss, Eyong, Faro mezili, Frake, Framire, Fromager, Gombe, Iatanza, Igaganga, Ilomba, Iroko, Izombe, kekele, Kondroti, Kossipo, Kotibe, Koto, Lati, Makore, Moabi, Movingui, Mukulungu, Naga, Nieuk, Okan, Okoume, Onzabili K, Osanga, Ovoga, Ozigo, Padouk rouge, Pao rosa, Sapelli, Sipo, Tali, Tchitola, Tiama, Tola, Wenge , Zingana | Abale, Abura, Acajou blanc ; Afok ahie, Aiélé/Abel; Ako, Akossika, Alep, Andoung brun, Aningre A, Assamela, Avodire, Awoura, Ayous, Azobe, Bilinga, Bodioa, Bosse fonce, Bubinga E, Diana Z, Dibetou, Doussie blanc, Eben, Ekaba, Ekoune, Emien, Etimoe, Eveuss, Eyong, Faro mezili, Frake, Framire, Fromager, Gombe, Iatanza, Igaganga, Ilomba, Iroko, Izombe, kekele, Kondroti, Kossipo, Kotibe, Koto, Lati, Makore, Moabi, Movingui, Mukulungu, Naga, Nieuk, Okan, Okoume, Onzabili K, Osanga, Ovoga, Ozigo, Padouk rouge, Pao rosa, Sapelli, Sipo, Tali, Tchitola, Tiama, Tola, Wenge , Zingana | Abale, Abura, Acajou blanc ; Aiélé/Abel; Ako, Akossika, Alep, Andoung brun, Aningre A, Assamela, Avodire, Awoura, Ayous, Azobe, Bilinga, Bodioa, Bosse fonce, Bubinga E, Diana Z, Dibetou, Doussie blanc, Eben, Ekaba, Ekoune, Emien, Etimoe, Eveuss, Eyong, Faro mezili, Frake, Framire, Fromager, Gombe, Iatanza, Igaganga, Ilomba, Iroko, Izombe, kekele, Kondroti, Kossipo, Kotibe, Koto, Lati, Makore, Moabi, Movingui, Mukulungu, Naga, Nieuk, Okan, Okoume, Onzabili K, Osanga, Ovoga, Ozigo, Padouk rouge, Pao rosa, Sapelli, Sipo, Tali, Tchitola, Tiama, Tola, Wenge , Zingana |

## Annexe 2.7 : Liste des 20 essences les plus récoltées dans la partie camerounaise du Bassin du Congo en 2010

(MINFOF, 2011 cité par de Wasseige et al., 2012).

| N° | Essences | Denomination scientifique | Taux de recolte(%) | Statut IUCN (2013) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Ayous/Obéché | *triplochiton scleroxylon* | 21,40 | LC |
| 2 | Fraké/Limba | *terminalia superba* | 14,15 | NC |
| 3 | Azobe/Bongossi | *lophira alata* | 6,89 | VU |
| 4 | Sapelli | *entandrophragma cylindricum* | 6,47 | VU |
| 5 | Dabema | *piptadeniastrum africanum* | 5,23 | NC |
| 6 | Bilinga | *nauclea diderrichii* | 4,57 | VU |
| 7 | Tali | *erythropleum ivorense* | 4,18 | NC |
| 8 | Movingui | *distemonanthus benthamianus* | 3,91 | NC |
| 9 | Eyong | *eribroma oblonga* | 3,74 | VU |
| 10 | Iroko | *Milicia excelsa* | 2,8 | NT |
| 11 | Okan/Adoum | *cylicodiscus gabonensis* | 2,55 | NC |
| 12 | Ilomba | *pycnanthus angolensis* | 2,43 | NC |
| 13 | Padouk | *pterocarpus soyauxii* | 1,58 | NC |
| 14 | Okoume | *Aucoumea klaineana* | 1,18 | VU |
| 15 | Kosipo | *entandrophragma candollei* | 1,17 | VU |
| 16 | Aiele | *canarium schweinfurthii* | 1,13 | NC |
| 17 | Dibetou/Bibolo | *lovoa trichiliodes* | 1,12 | VU |
| 18 | Moabi | *baillonella toxisperma* | 0,94 | VU |
| 19 | Acajou | *khaya ivorensis* | 0,78 | VU |
| 20 | Naga/Ekop Naga | *brachystegia cynometrioides* | 0,74 | NC |
| | **Total** | | **86,96** | |

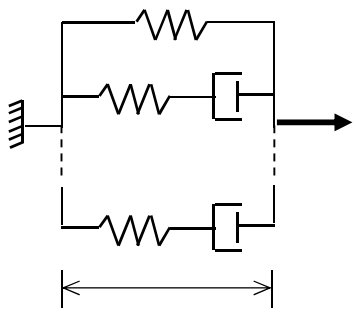
## Annexe 2.8: Les contreplaqués selon les essences exportées entre 2004-2012 en %

| N° | Essences | % |
|---|---|---|
| 1 | Ayous | 35,34% |
| 2 | Lotofa | 20,98% |
| 3 | Fraké | 16,73% |
| 4 | Ilomba | 16,60% |
| 5 | Onzabili | 3,79% |
| 6 | Eyong | 2,18% |
| 7 | Tola | 2,17% |
| 8 | Fromager | 0,67% |
| 9 | Aiélé | 0,48% |
| 10 | Acajou de bassam | 0,40% |
| 11 | Sapelli | 0,30% |
| 12 | AningréA | 0,11% |
| 13 | Ekop ekusek | 0,08% |
| 14 | Kossipo | 0,06% |
| 15 | Iroko | 0,027 |
| 16 | Azobé | 0,022 |
| 17 | AningréR | 0,014 |
| | Etc… | |

## Annexe 3.1 : Modèle de Maxwell généralisé

Le modèle de Maxwell généralisé utilisé se met sous la forme :

$$\sigma(t) = \sum_{\mu=0}^{r} \sigma_\mu(t) \Rightarrow \sigma(t) = E_0 \varepsilon_0 + \sum_{\mu=1}^{r} E_\mu e^{-\alpha_\mu (t-t_0)}.\, \varepsilon_0$$



### 3.1.1 Fonction de relaxation :

$$\sigma(t) = r(t,t_0)\varepsilon_0 \Rightarrow r(t,t_0) = E_0 + \sum_{\mu=1}^{r} E_\mu e^{-\alpha_\mu (t-t_0)}$$

$$\Rightarrow r(t,t_0) = E_0 \rho(t,t_0) \text{ où } \rho(t,t_0) = 1 + \sum_{\mu=1}^{r} \gamma_\mu e^{-\alpha_\mu (t-t_0)}$$

$$O\text{ù } \gamma_\mu = \frac{E_0}{E_\mu} \; et \alpha_\mu = \frac{E_\mu}{\eta_\mu} \; (en\ s^{-1})$$

### 3.1.2 Formulation d'incrémentation

L'évolution de la contrainte pendant un incrément de temps fini [t, t+Δt] en application de l'équation de Boltzmann :

$$\Delta\sigma = \sigma(t+\Delta t) - \sigma(t) = E_0 \left( \int_0^{t+\Delta t} \rho(t+\Delta t,\tau)\dot{\varepsilon}(\tau)d\tau - \int_0^{t} \rho(t,\tau)\dot{\varepsilon}(\tau)d\tau \right)$$

$$\Rightarrow \Delta\sigma = E_0 \left( \int_t^{t+\Delta t} \rho(t+\Delta t,\tau)\dot{\varepsilon}(\tau)d\tau - \int_0^{t} [\rho(t+\Delta t,\tau) - \rho(t,\tau)]\dot{\varepsilon}(\tau)d\tau \right)$$

$$avec\ \rho(t,\tau) = e^{-\alpha_\mu (t-\tau)}$$

La loi de comportement viscoélastique sous une forme incrémentale :

$$\forall\, t, \Delta t \;\; \Delta\sigma = \widetilde{K}\Delta\varepsilon + \sigma^{his}(t) \quad avec$$

$$\widetilde{K} = E_0 \left( \frac{1 - e^{-\alpha_\mu (t-t_0)}}{\alpha_\mu \Delta t} \right)$$

$$et \;\; \sigma^{his}(t) = \left(1 - e^{-\alpha_\mu (t-t_0)}\right)\sigma_\mu(t)$$

$\widetilde{K}$ : Rigidité fictive, dépend de la longueur du pas de temps, et des paramètres de Kelvin.

$\sigma^{his}(t)$ : Terme de l'histoire, dépend de la longueur du pas de temps, et des états de contraintes et déformations en début de l'incrément de temps

### 3.1.3 Généralisation du modèle de la chaîne d'un MAXWELL

La fonction de relaxation est :

$$r(t,\tau) = E_0 \left( 1 + \sum_{\mu=1}^{r} \gamma_\mu \rho_\mu(t,\tau) \right) avec \;\; \rho_\mu(t,\tau) = e^{-\lambda_\mu (t-\tau)}$$

L'increment de la contrainte (Boltzmann) donne :

$$\forall\, t, \Delta t \quad \Delta\sigma = \sigma(t+\Delta t) - \sigma(t) = \int_0^{t+\Delta t} r(t+\Delta t, \tau)\dot{\varepsilon}(\tau)d\tau - \int_0^{t} r(t,\tau)\dot{\varepsilon}(\tau)d\tau$$

$$\Rightarrow \forall\, t, \Delta t \quad \Delta\sigma = E_0\left[\int_0^{t+\Delta t}\left(1+\sum_{\mu=1}^{r}\gamma_\mu\rho_\mu(t+\Delta t,\tau)\right)\dot{\varepsilon}(\tau)d\tau - \int_0^{t}\left(1+\sum_{\mu=1}^{r}\gamma_\mu\rho_\mu(t,\tau)\right)\dot{\varepsilon}(\tau)d\tau\right]$$

La loi de comportement viscoélastique sous une forme incrémentale est :

$$\widetilde{K} = E_0\left[1+\sum_{\mu=1}^{r}\gamma_\mu\left(\frac{1-e^{-\alpha_\mu\,\Delta t}}{\alpha_\mu\Delta t}\right)\right]$$

$$\forall\, t, \Delta t \;\; \Delta\sigma = \widetilde{K}\,\Delta\varepsilon + \sigma^{his}(t) \quad avec \quad et \;\; \sigma^{his}(t) = \left(1-e^{-\alpha_\mu\,\Delta t}\right)\sigma_\mu(t)$$

$\widetilde{K}$ : Rigidité fictive, dépend de la longueur du pas de temps, et des paramètres de Kelvin.

$\sigma^{his}(t)$ : Terme de l'histoire, dépend de la longueur du pas de temps Δt, et de l'état de la déformation $\varepsilon$ (t) et des récentes valeurs gagnéespar la contrainte internede partition $\sigma_\mu(t)$au début de l'incrément.

### 3.1.4 Formulation en 3D

#### 3.1.4.1 Matrice de rigidité de la relaxation

La contrainte de relaxation pour une déformation constante est :$\{\sigma(t)\} = [r(t,t_0)]\{\varepsilon_0\}$

La matrice de relaxation :

Général : $[r(t,\tau)] = \rho(t,\tau)[K_0]$ $avec$ $[r(t,t)] = [K_0] \Rightarrow [r(t,t)] = [1]$

Simplifié :$[r(t,\tau)] = \rho(t,t_0)[1]$

$$d'où\;\; r(t,\tau) = \rho(t,\tau)[K_0] \;\; où\;\; \rho(t,t_0) = \gamma_0 + \sum_{\mu=0}^{r}\gamma_\mu\rho_\mu(t,t_0) \;\; et\;\; \rho_\mu(t,t_0) = e^{-\alpha_\mu(t-t_0)}$$

#### 3.1.4.2 La formulation incrémentale

La formulation incrémentale écite dans ce cas est :

$$\forall\, t, \Delta t \;\; \{\Delta\sigma\} = \left[\widetilde{K}\right]\{\Delta\varepsilon\} - \left(\left\{\sigma^{his}(t)\right\} + \left[\widetilde{K}\right]\{\Delta\varepsilon_w\}\right) \quad avec \;\; \left[\widetilde{K}\right] = \widetilde{\gamma}\,[K_0]$$

$$O\grave{u}\;\widetilde{\gamma} = \gamma_0 + \sum_{\mu=1}^{r}\gamma_\mu\frac{1-e^{-\alpha_\mu\,\Delta t}}{\alpha_\mu\Delta t}$$

$$\left\{\sigma^{his}(t)\right\} = \sum_{\mu=1}^{r}\left(1-e^{-\alpha_\mu\Delta t}\right)\left\{\sigma_\mu(t)\right\}$$

$\left[\widetilde{K}\right]$: Matrice de rigidité fictive, dépend de la longueur du pas de temps, et des paramètres de Maxwell.

$\left\{\sigma^{his}(t)\right\}$: Terme de l'histoire, dépend de la longueur du pas de temps Δt, et des récentes valeurs gagnées par la contrainte interne de partition $\left\{\sigma_\mu(t)\right\}$au début de l'incrément.

## Annexe 3.2 : Tableau recapitulatif des résultats des tests de traction de l'essence Bete :

| N° des éprouvettes | Caractéristiques dans le sens Longitudinal | | Caractéristiques dans le sens Transversal | |
|---|---|---|---|---|
| | MOE (MPa) dans le sens longitudinal | Résistance de Rupture en traction (MPa) | MOE (MPa) dans le sens transversal | Résistance de Rupture en traction (MPa) |
| 1 | 14760 | 60 | 317 | 4.3 |
| 2 | 14604 | 59 | 310 | 3.9 |
| 3 | 14398 | 56 | 320 | 3.7 |
| 4 | 14625 | 58 | 300 | 3.6 |
| 5 | - | - | - | - |
| 6 | - | - | 297 | 4.5 |
| 7 | 14841 | 62 | 312 | 4.4 |
| 8 | 14650 | 57 | 314 | 3.95 |
| 9 | - | - | - | - |
| 10 | 14731 | 61 | - | - |
| Moyenne | 14628 | 59 | 310 | 4.05 |
| Ecart type | 85.67 | 1.71 | 6.57 | 0.3 |

## Annexe 4.1 : Diagramme de phase de l'eau

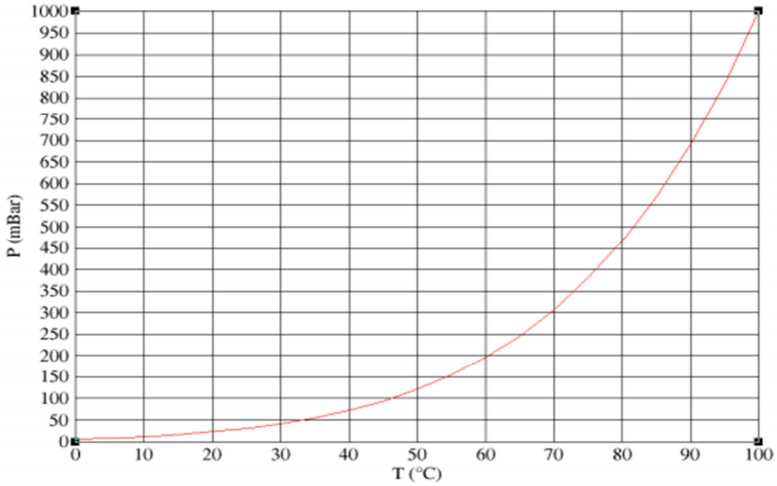



*Figure1: Diagramme de phase de l'eau.*

## Annexe 4.2 : Teneur en eau du CP et pression dans l'enceinte de séchage pour une température de 65°C, renseignées par un microprocesseur

A titre d'exemple, la figure ci-dessous indique une teneur moyenne en eau de 22.7% une pression de 150 mbar et une température 65°C.

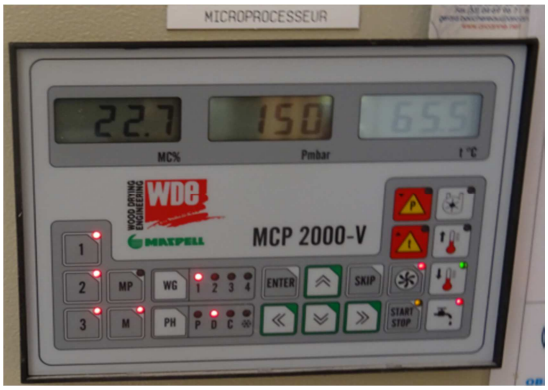



*Figure2 : Teneur en eau du CP et pression dans l'enceinte de séchage pour une température de 65°C, renseignées par un microprocesseur.*

## Annexe 4.3 : Teneur en eau du CP et pression dans l'enceinte de séchage pour une température de 65°C, renseignées par un microprocesseur

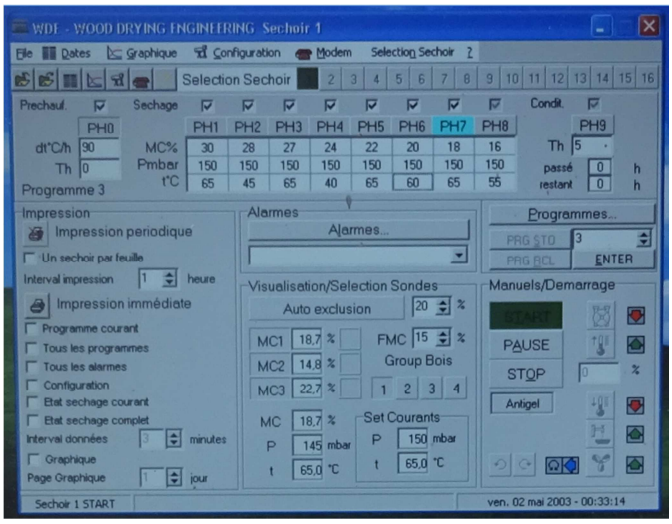



*Figure3 : Données du microprocesseur à la phase 7 du séchage avec une teneur moyenne 18,7% et la température de 65°C.*

## Annexe 4.4 : Tableau récapitulatif des résultats des tests de flexion quatre points du CP issu de l'essence Bete :

| N° des éprouvettes | Caractéristiques dans le sens Longitudinal | | Caractéristiques dans le sens Transversal | |
|---|---|---|---|---|
| | MOE (MPa) | Contrainte de rupture en flexion (MPa) | MOE (MPa) | Contrainte de rupture en flexion (MPa) |
| 1 | 8755 | 28.3 | 3789 | 8.8 |
| 2 | 7945 | 26.7 | 3125 | 7.3 |
| 3 | 6870 | 22 | 2950 | 6.9 |
| 4 | 6640 | 21.5 | 3100 | 7.2 |
| 5 | 7300 | 23;6 | 2800 | 6.5 |
| 6 | 7550 | 24.4 | 2900 | 6.8 |
| 7 | 9300 | 30.1 | 3010 | 7 |
| 8 | 8650 | 31 | 2300 | 5.4 |
| 9 | 6550 | 21.4 | 2850 | 6.6 |
| 10 | 8900 | 29 | 2750 | 6.4 |
| Moyenne | 7846 | 23.44 | 2957.4 | 6.89 |
| Ecart type | 864 | 3.31 | 238.88 | 0.55 |

# Annexe 4.5 : Caractéristiques et dimensionnement des CP

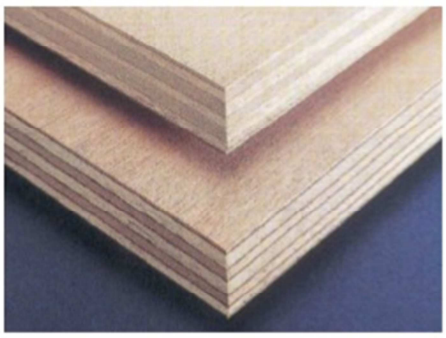


©Centre technique du bois et de l'ameublement – 2007 – Reproduction interdite.

## PANNEAUX CONTREPLAQUES

### Définition :

Panneau, plat ou moulé, composé d'un empilage de plis de bois. La cohésion entre les couches de l'empilage est assurée par un liant organique.



### Caractéristiques et dimensionnement :

**Classification :**
Le panneau contreplaqué le plus courant présente :
- une composition symétrique dans l'épaisseur
- des plis contigus dont le sens des fils est perpendiculaire
- des plis constitués de placages jointés sur leur rives. Plusieurs plis peuvent être empilés fil sur fil pour former une couche.

Si les couches fil sur fil dominent, on obtient un panneau LAMIBOIS (LVL dans la terminologie anglo-saxonne, cf fiche correspondante).

Les panneaux contreplaqués peuvent être classés selon différents critères. Selon les classes de service, la norme NF EN 636 distingue 3 types de panneaux :
- Panneaux utilisés en milieu sec (636-1)
- Panneaux utilisés en milieu humide (636-2)
- Panneaux utilisés en milieu extérieur (636-3)

**Collage et classe d'emploi (classe de risques d'attaques biologiques : cf. fiche 51.01) :**
Suivant la qualité de leur collage collage, les contreplaqués peuvent être utilisés dans les classes d'emploi (selon NF EN 335-3) suivantes : classe de collage 1 ( milieu intérieur sec) pour la classe d'emploi 1
- classe de collage 2 (milieu intérieur humide) pour la classe d'emploi 2
- classe de collage 3 (milieu extérieur) pour la classe d'emploi 3

**Dimensions courantes :**
- Epaisseur : 6, 8, 10, 12, 15, 18, 22, 25, 30 mm
- Largeur : 1.25 m, 1.50 m
- Longueur : 2.50 m, 3.10 m

La longueur d'un panneau correspond à la dimension dans le plan dans le sens du pli de face.

**Exigences générales pour tous types de contreplaqués :**
La norme NF EN 636 définit les valeurs des exigences à respecter pour un certain nombre de caractéristiques, et les normes d'essais correspondantes.

| Caractéristiques | Exigences |
|---|---|
| **Tolérances sur dimensions nominales**<br>• Epaisseur panneaux poncés ou non poncés<br>• Longueur et largeur | Définis dans la norme NF EN 315<br>± 3.5 mm |
| **Tolérance de rectitude des bords : NF EN 315** | 1.0 mm/m |
| **Tolérance d'équerrage : NF EN 315** | 1.0 mm/m |
| **Dégagement de formaldéhyde: (*) NF EN 717-1**<br>• classe E1 (NF EN 636)<br>• classe E2 (NF EN 636) | <br>≤ 0,124mg/m3 d'air<br>> 0,124mg/m3 d'air |

*Ces valeurs sont caractérisées par une humidité dans le matériau correspondant à une humidité relative de 65% et une température de 20°C.*
*(*) : Les panneaux à base de colles phénoliques appartiennent systématiquement à la classe E1.*

**Caractéristiques mécaniques pour le calcul :**
Le dimensionnement des structures en bois se fait conformément aux règles CB71 ou Eurocode 5 (EC5).
Les contraintes, rigidités et masses volumiques sont déterminées selon NF EN 789 et NF EN 1058. Elles dépendent de la composition du panneau (essences, nombre, épaisseur des plis):
La norme XP ENV 14272 permet d'estimer par le calcul les caractéristiques mécaniques de tout contreplaqué d'une essence donnée à partir des propriétés déterminées sur un lot d'un contreplaqué donné réalisé à partir de cette essence .

**La conversion des contraintes à 5 % d'exclusion (selon EN 789 et EN 1058) en contraintes admissibles selon CB 71, est traitée par la norme NF P 21-400 :**

| Symbole | Désignation | Unité | Okoumé | Ozigo, Sapelli, Sipo, Bouleau, Douglas Pin Maritime | Hêtre, Keruing |
|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_f$ | Contrainte en flexion | N / mm² | ≥ 12.4 | ≥ 12.4 | ≥ 12.4 |
| $\tau_v$ | Contrainte en cisaillement dans le plan (de voile) | N / mm² | 3.6 | 4.3 | 5.7 |
| $\tau_r$ | Contrainte en cisaillement roulant | N / mm² | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
| $E_G$ | Module de cisaillement | kN / mm² | *Selon données du fabricant* | | |
| $\rho_{moy}$ | Masse volumique moyenne | kg/m³ | *Selon données du fabricant* | | |

*Pour les panneaux comportant plusieurs essences, prendre les valeurs de l'essence la plus faible.*