

Université de São Paulo - USP

Ecole Supérieure d'Agriculture « Luiz de Queiroz » – ESALQ

Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts - ENGREF

Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur le Matériau Bois - LERMAB

Effets du traitement thermique sur les propriétés physico-mécaniques et analyses anatomiques et physiques du bois d'*Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* et *Corymbia (Eucalyptus) citriodora*



(Murta, 2007)

Leonardo MURTA

Formation d'Ingénieurs Forestiers

Erasmus (Brésil)

Octobre 2007

Université de São Paulo - USP
Ecole Supérieure d'Agriculture "Luiz de Queiroz" – ESALQ
Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts - ENGREF
Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur le Matériau Bois - LERMAB

Effets du traitement thermique sur les propriétés physico-mécaniques et analyses anatomiques et physiques du bois d'*Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* et *Corymbia (Eucalyptus) citriodora*

Leonardo MURTA
Formation d'Ingénieurs Forestiers
Erasmus (Brésil)

Octobre 2007

RESUME

Les dommages environnementaux actuels augmentent les préoccupations sur les forêts, ainsi, des espèces commerciales, comme *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* et *Corymbia (Eucalyptus) citriodora* ont un rôle de plus en plus important. Ce travail a permis d'étudier ces espèces et ses objectifs ont été les suivants : connaître les effets du traitement thermique à différentes températures, avec présence d'air ou d'azote, et évaluer les altérations des propriétés physico-mécaniques du bois, à travers un analyseur mécanique dynamique (DMA). De plus, cette étude a permis d'étudier la structure anatomique du bois et d'établir une relation avec les densités respectives. Les résultats indiquent que la température change les propriétés du bois et qu'il existe une relation entre la densité et les caractéristiques anatomiques.

Mots-clés : *E.grandis*, *E.saligna*, *C.citriodora*, Propriétés physico-mécaniques et anatomiques

ABSTRACT

The current ambient damages increase some concerns with the forests, thus, commercial species like the *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Corymbia (Eucalyptus) citriodora* earn importance. This work, studying this species, wants to know the effects of the thermal treatment in different temperatures, with air or nitrogen, and to evaluate the alterations in the physicist-mechanical properties of the wood, through one Dynamic Mechanical Analyser (DMA). Moreover, study the anatomical structure of the wood with one Electron Microscope and relate with the respective densities. The results indicate that the temperature modifies the wood properties and that exist one relation between the density and the anatomical properties.

Key-words : *E.grandis*, *E.saligna*, *C.citriodora*, physicist-mechanical and anatomical properties.

RESUMO

Os danos ambientais atuais aumentam as preocupações com as florestas, assim, espécies comerciais, como o *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Corymbia (Eucalyptus) citriodora* ganham importância. Esse trabalho, estudando estas espécies, visa conhecer os efeitos do tratamento térmico em diferentes temperaturas, na presença de ar ou nitrogênio, e avaliar as alterações das propriedades físico-mecânicas da madeira, através de uma Dynamic Mechanical Analyser (DMA). Além disso, estudar a estrutura anatômica da madeira com um Microscópio Eletrônico e relacionar com as respectivas densidades. Os resultados indicam que a temperatura altera as propriedades da madeira e que existe uma relação entre a densidade e as características anatômicas.

Palavras-chaves : *E.grandis*, *E.saligna*, *C.citriodora*, propriedades físico-mecânicas e anatômicas

REMERCIEMENTS

Aux Docteurs Mário Tomazello Filho, Patrick Perré et Giana Almeida pour l'amitié, la patience, le dévouement, la disponibilité et l'orientation dans la réalisation de ce travail.

Au Docteur José Leonardo de Moraes Gonçalves pour l'amitié, le dévouement et la confiance.

Au Docteur José Otávio Brito pour l'aide, l'attention et la concession des échantillons.

Au Docteur Geraldo Bortoletto Júnior pour l'attention et la fourniture de son laboratoire pour le stockage et le découpe des échantillons

À mon collègue Tiago pour toute la force, l'encouragement et l'amitié en tous les moments.

À l'Ingénieur João Carlos Mendes pour la accueil, l'attention, la préparation et l'accompagnement de la découpe des arbres.

À l'Ingénieur Rildo Moreira e Moreira pour toute l'attention et l'efficacité de son travail.

À l'Estação Experimental d'Anhembi et tous ses fonctionnaires qui, de quelque manière, ont contribué pour ce travail.

À la scierie de l'Escola Superior d'Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ) et tous ses fonctionnaires pour tout le travail et la disponibilité.

Aux techniciens Patrice, pour toute la collaboration, l'amitié et l'aide avec le français et Jean-Claude pour tout l'aide, l'attention et l'effort.

À tout les personnes de l'équipe de travail du LERMAB (Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur le Matériau Bois), Carole, Romain, Philippe, Françoise, Tatjana, Alexandra, Aristide, Bakari, Naoufel, Floran, Julien, Asghar, Saloua, Naoual, Tuan et Isabelle, pour la patience et l'amitié.

Aux brésiliennes Paola, Ana et Flora pour toute l'affection, l'amitié et l'incitation et mes amis français : Daniel, Anny, Floran et Martin.

À ma famille et à Gabriella pour l'amour et l'aide, qui toujours m'aident en tous les chemins de ma vie.

À la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pour l'octroi de la bourse.

À l'ESALQ et au Département de Sciences Forestières et à tout l'équipe des secrétaires et assistants.

À l'École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGRF) et tout ses fonctionnaires pour l'assistance et la patience.

À tous ceux qui, de quelque manière, ont contribué à la réalisation de ce travail.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	3
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	5
TABLE DES TABLEAUX.....	7
TABLE DES ANNEXES.....	9
TABLE DES SYMBOLES.....	11
1. INTRODUCTION.....	13
2. RÉVISION BIBLIOGRAPHIQUE.....	15
2.1. TRAITEMENT THERMIQUE.....	15
2.2. ANATOMIE DU BOIS.....	17
2.3. PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES DU BOIS D'EUCALYPTUS.....	20
2.3.1. <i>Rhéologie des solides.....</i>	<i>21</i>
2.3.2. <i>Caractérisation des propriétés viscoélastiques dans les essais harmoniques (Placet, 2006)</i>	<i>24</i>
.....	24
3. MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	27
3.1. CARACTÉRISTIQUES DES ESSENCES FORESTIÈRES.....	27
3.2. ÉCHANTILLONNAGE.....	30
3.3. LOCALISATION ET CARACTÉRISATION DU SECTEUR EXPÉRIMENTAL.....	30
3.4. SÉLECTION DES ARBRES ET COUPE DES ÉCHANTILLONS DE LA RONDELLE.....	31
3.5. MASSE VOLUMIQUE BASALE DU BOIS.....	32
3.6. ANALYSES ANATOMIQUES ET PHYSIQUES DU BOIS.....	32
3.6.1. <i>Pourcentages de duramen, d'aubier et d'écorce.....</i>	<i>32</i>
3.6.2. <i>Analyses microscopiques.....</i>	<i>33</i>
3.6.3. <i>Variation du volume du bois, dans le sens moelle-écorce.....</i>	<i>33</i>
3.7. ANALYSE DES PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES DU BOIS AVEC LE DMA 2980.....	34
3.7.1. <i>Description du DMA (Analyseur mécanique dynamique).....</i>	<i>34</i>
3.7.2. <i>Mors de flexion trois points du DMA.....</i>	<i>35</i>
3.7.2.1. <i>Limites d'utilisation du mors de flexion trois points.....</i>	<i>36</i>
3.7.2.2. <i>Préparation des échantillons pour un mors de flexion 3 points.....</i>	<i>36</i>
3.7.3. <i>Conditions des essais au DMA.....</i>	<i>38</i>
3.7.3.1. <i>Essais préliminaires pour la programmation du Thermal Advantage (Programme de pilotage du DMA).....</i>	<i>38</i>
3.7.3.2. <i>Programmation du logiciel en fonction du traitement.....</i>	<i>39</i>
3.7.3.3. <i>Analyse des résultats des propriétés physico-mécaniques obtenues avec le DMA.....</i>	<i>40</i>

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION	41
4.1. MASSE VOLUMIQUE BASALE	41
4.2. ANALYSES ANATOMIQUES ET PHYSIQUES DU BOIS	41
4.2.1. <i>Teneurs en duramen, aubier et écorce.....</i>	<i>41</i>
4.2.2. <i>Images en microscopie électronique à balayage environnementale (MEBE).....</i>	<i>44</i>
4.2.3. <i>Variations dimensionnelles (sens : moelle – écorce).....</i>	<i>46</i>
4.2.3.1. <i>Domaine hygroscopique (du PSF jusqu'à l'état anhydre)</i>	<i>46</i>
4.2.3.2. <i>De l'état anhydre jusqu'à la fin du traitement thermique à 220 °C</i>	<i>50</i>
4.3. EFFETS DU TRAITEMENT THERMIQUE AVEC LE DMA	52
4.3.1. <i>Coloration des échantillons.....</i>	<i>52</i>
4.3.2. <i>Perte de masse et retrait tangentiel après traitement thermique au DMA.....</i>	<i>53</i>
4.4. ANALYSE DES RÉSULTATS DES PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES OBTENUES AVEC LE DMA	55
4.4.1. <i>Effet de la température dans la même essence</i>	<i>56</i>
4.4.1.1. <i>Traitement avec air.....</i>	<i>56</i>
4.4.1.2. <i>Traitement avec azote</i>	<i>59</i>
4.4.2. <i>Variations entre essences soumises à même température</i>	<i>61</i>
4.4.2.1. <i>Traitement avec air.....</i>	<i>61</i>
4.4.2.2. <i>Traitement avec azote.....</i>	<i>63</i>
4.4.3. <i>Comparaison entre les traitements : air X azote</i>	<i>65</i>
5. CONCLUSION.....	67
5.1. ANALYSES ANATOMIQUES ET PHYSIQUES DU BOIS	67
5.2. ANALYSE DES PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES DES ÉCHANTILLONS SOUMIS À DES ESSAIS AU DMA	67
6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	69
7. ANNEXES.....	75
LISTE DE CONTACTS.....	73
ANNEXES.....	75

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 – Produits issus du bois.....	16
Figure 2 – Caractérisations macro et microscopique des régions du bois (Placet, 2006).....	18
Figure 3 – Plans d'étude et structure anatomique d'un bois de feuillu (Dendrologie, Anatomie et Identification des bois – ESALQ/USP, 2005)	19
Figure 4 – La structure de la paroi cellulaire et ses fibres et trachéïdes.....	20
Figure 5 – Structure de la paroi secondaire : molécules de cellulose (Placet, 2006).....	20
Figure 6 - Influence de la fréquence.....	23
Figure 7 – Influence de la température et zone de transition vitreuse.....	23
Figure 8 – Composition chimique du bois (Fondements et applications de la chimie du bois – ESALQ/USP, 2006).....	23
Figure 9 – Formulation complexe des fonctions de contrainte et de déformation (Placet, 2006).....	24
Figure 10 – Représentation d'un plan complexe (Placet, 2006).....	25
Figure 11 – Aspects de la plantation d' <i>E.grandis</i>	27
Figure 12 – Aspects de la plantation d' <i>E.saligna</i>	28
Figure 13 – Aspects de la plantation de <i>C.citriodora</i>	29
Figure 14 – Localisation de la ville d'Anhembi dans l'État de Sao Paulo.....	30
Figure 15 – Échantillonnage des disques des arbres d'Eucalyptus et de corymbia.....	31
Figure 16 – Disques d' <i>E.grandis</i> : variation diamétrale en fonction de la hauteur de coupe du tronc..	31
Figure 17 – Section transversale d'un disque et lignes de démarcation pour la mesure des parties du duramen, de l'aubier et de l'écorce.....	32
Figure 18 – Section transversale d'un barreau : échantillon marqué dans le sens radial	34
Figure 19 – DMA: aspects généraux de l'appareil.....	35
Figure 20 – DMA : mors de flexion 3 points	35
Figure 21 – Plage de fonctionnement du mors de flexion 3 points (Référence: Analyseur Mécanique Dynamique Manuel d'utilisation, Vol. 2).....	36
Figure 22 – Préparation des échantillons de bois : détail du travail de la microtronçonneuse.....	37
Figure 23 –Variations en pourcentages du duramen, aubier et écorce à différentes hauteurs du tronc (a – <i>E.grandis</i> ; b – <i>E.saligna</i> ; c – <i>C.citriodora</i>)	43

Figure 24 – Variations des surfaces des disques des troncs à différentes hauteurs du sol pour les trois essences d'Eucalyptus	44
Figure 25 – Images microscopiques d'une coupe d' <i>Eucalyptus grandis</i> (réalisées par Almeida, 2007)	45
Figure 26 – Images microscopiques d'une coupe d' <i>Eucalyptus saligna</i> (réalisées par Almeida, 2007)	46
Figure 27 – Images microscopiques d'une coupe de <i>Corymbia citriodora</i> (réalisées par Almeida, 2007).....	46
Figure 28 – Retrait (a – radial ; b – tangentiel ; c – volumique) des échantillons du bois d'Eucalyptus de l'état vert à l'état anhydre	49
Figure 29 – Perte de masse des échantillons du bois d'Eucalyptus après traitement thermique à 220 °C	50
Figure 30 – Retrait (a – radial ; b – tangentiel ; c – volumique) volumique des échantillons du bois d'Eucalyptus après traitement thermique à 220 °C	51
Figure 31 – Différence de couleur entre les échantillons d'Eucalyptus soumis à traitement thermique	52
Figure 32 – <i>E.grandis</i> : Perte de masse et retrait tangentiel en fonction de la température	54
Figure 33 – <i>E.saligna</i> : Perte de masse et retrait tangentiel en fonction de la température.....	55
Figure 34 – <i>C.citriodora</i> : Perte de masse et retrait tangentiel en fonction de la température	55
Figure 35 - Comparaison du module de stockage (adimensionnel) des échantillons.....	58
Figure 36 - Comparaison du module de stockage (adimensionnel) des échantillons.....	60
Figure 37 – Comparaison entre les trois espèces d'Eucalyptus soumises à : a – 60 °C ; b – 140 °C ; c – 180 °C ; d – 220 °C lors de l'essai au DMA.....	62
Figure 38 – Comparaison entre les trois espèces d'Eucalyptus soumises à l'essai (sans oxygène) de :	64
Figure 39 – Comparaison entre les traitements (Air X Azote) de : a – <i>E.grandis</i> ; b – <i>E.saligna</i> ;	66

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Propriétés physico-mécaniques et anatomiques du bois d' <i>E.grandis</i>	27
Tableau 2 - Propriétés physico-mécaniques et anatomiques du bois d' <i>E.saligna</i>	28
Tableau 3 - Propriétés physico-mécaniques et anatomiques du bois d' <i>C.citriodora</i>	29
Tableau 4 – Traitements thermiques des échantillons avec air (A).....	38
Tableau 5 – Traitements thermiques des échantillons avec azote (N)	38
Tableau 6 – Conditions du traitement à 60 °C	39
Tableau 7 – Autres traitements (140, 180, 220, 260 et 280 °C).....	39
Tableau 8 – Masse volumique basale du bois de tous les arbres et valeurs moyennes par essence.....	41
Tableau 9 – Variations des valeurs et pourcentages du duramen, de l'aubier et de l'écorce à différentes hauteurs du tronc.....	43

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1-) Photos des 3 barreaux (de gauche à droite : *E.grandis*, *E.saligna*, *C.citriodora*) avec la localisation des échantillons pour les essais de retrait le long du rayon :..... 75

Annexe 2-) Photos des barreaux des 9 arbres avec localisation des échantillons pour les essais en DMA (la première photo à gauche est l'arbre 1 et la dernière à droite numéro 9. Les chiffres marqués dans les barreaux indiquent le numéro de l'arbre) (1 à 3 – *E.grandis*; 4 à 6 – *E.saligna* et 7 à 9 – *E.citriodora*)..... 75

Annexe 3-) Les traitements thermiques du bois et leurs durées 76

Annexe 4-) Tableaux comparatifs entre les modules de stockages initiaux (dernier moment des échantillons soumis à température de 100 °C). Les échantillons du traitement à 60 °C n'ont pas subi ce processus. Les 3 premiers sont les tableaux des traitements avec air et les 3 derniers avec azote..... 78

Annexe 5-) Graphiques comparatifs entre les trois arbres de chaque essence (Tg Delta)..... 80

Annexe 6-) Tableaux des valeurs de densité anhydre, retraits et facteur d'anisotropie du point de saturation à l'état anhydre..... 84

Annexe 7-) Tableaux des valeurs de densité anhydre, des retraits et des relations T/R de l'état anhydre jusqu'à la fin du traitement thermique à 220 °C..... 85

Annexe 8-) Perte de masse et retrait tangentiel des échantillons soumis au DMA 86

Annexe 9-) Valeurs des coefficients de pertes avant et après le traitement au DMA (à fréquence de 0,1 Hz). 88

Annexe 10-) Valeurs de densité anhydre de chaque échantillon et graphiques du module de stockage par rapport aux valeurs de densité (Air : tableau et graphique ; azote : tableau et graphique). 88

Annexe 11-) Humidité des échantillons soumis au traitement à 60 °C (avec utilisation du Silica Gel en dessiccateur pour absorber l'humidité)..... 89

TABLE DES SYMBOLES

<i>Arb</i>	Arbre
<i>DMA</i>	Analyseur mécanique dynamique
<i>DHP</i>	Diamètre à Hauteur de Poitrine
<i>DSC</i>	Calorimétrie à balayage différentiel
D_b	Densité basique
D_0	Densité anhydre
<i>ENGREF</i>	École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
<i>ESALQ</i>	École Supérieure d'Agriculture "Luiz de Queiroz"
$D_{anhydre}$	Mesures moyennes radiales ou tangentielles anhydres
D_{Vert}	Mesures moyennes radiales ou tangentielles à l'état vert
E^*	Module d'Young complexe
E'	Module de stockage
E''	Module de perte
E_0	Module d'Young apparent
f	Fréquence
<i>FA</i>	Facteur anisotrope
<i>ha</i>	Hectare
<i>Humid.</i>	Humidité
<i>Hz</i>	Hertz
I	Moment géométrique
L	Longueur
<i>LERMAB</i>	Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur le Matériau Bois
M_0	Masse anhydre
<i>MEBE</i>	Microscope Électronique à Balayage Environnemental
<i>Mod.</i>	Module
<i>MOE</i>	Module d'élasticité
<i>MPa</i>	Mégapascal
<i>BV</i>	Bois vert
N	Newton
<i>Pa</i>	Pascal
<i>PSF</i>	Point de saturation des fibres
t	Épaisseur de l'échantillon
$\tan \delta$	Facteur de perte ou coefficient de perte ou tangente de perte
<i>Témp.</i>	Température
<i>TRL</i>	Tangentiel, Radial, Longitudinal

<i>USP</i>	Université de São Paulo
<i>v</i>	Coefficient de Poisson
<i>V₀</i>	Volume anhydre
<i>V_s</i>	Volume saturé
<i>w</i>	Largeur de l'échantillon
<i>α</i>	Transition vitreuse
<i>β_{total}</i>	Retrait Radial (r) ou tangentiel (t)
<i>β_v</i>	Retrait Volumétrique
<i>δ</i>	Déphasage
<i>ε</i>	Déformation
<i>ε*</i>	Constante diélectrique complexe
<i>μm</i>	Micromètre
<i>σ</i>	Contrainte
<i>σ*</i>	Contrainte complexe
<i>ω</i>	Pulsation

1. INTRODUCTION

L'exploitation des forêts tropicales est associée, depuis les années 1970, à l'extinction d'espèces animales et végétales, au déboisement et aux menaces sur les peuples indigènes. Les avancées de la connaissance sur le réchauffement global, les dommages qui sont causés par l'émission de carbone et les changements climatiques apparus dans les dernières années nécessitent une meilleure protection des forêts.

Le Brésil possédant la deuxième surface forestière mondiale (566 000 000 ha), il s'y est développé des technologies améliorant l'exploitation forestière et la transformation du bois. En revanche, la croissance des activités sylvicoles et de la filière bois est aujourd'hui menacée par le défaut d'investissement pour la régénération des forêts exploitées, tandis que les consommateurs commencent à exiger l'éco-certification.

Ainsi, le bois devient une ressource menacée, en raison de ses nombreuses utilisations et des grandes quantités consommées.

Par conséquent, les forêts plantées se développent. Ceci est dû à leur fort potentiel de croissance, leur résistance aux pathogènes, à leur facilité de traitements sylvicole et leur exploitation raisonnée et réglementée. L'*Eucalyptus* est l'essence majoritaire des forêts plantées au Brésil. Il présente une bonne adaptation aux différents climats et sols sous ces latitudes.

Néanmoins, il est incontestable que le bois issu des forêts natives présente des caractéristiques, en général, supérieures à celles du bois issu des plantations. Le développement de procédés visant à améliorer les propriétés de l'Eucalyptus permettrait de substituer le bois issu des forêts natives par ce bois traité. Ceci engendrerait un bénéfice incontestable pour l'environnement.

Des différents procédés de préservation et de stabilisation dimensionnelle du bois, le traitement thermique se révèle particulièrement intéressant car les hémicelluloses sont dégradées en substances qui présentent une affinité importante avec l'eau. Alors, le bois traité, plus hydrophobe, pourra être utilisé dans la construction, le mobilier, la décoration, les instruments de musique, etc. Ainsi, le traitement thermique du bois d'Eucalyptus représente une valeur ajoutée.

Dans ce contexte, les objectifs de ce travail ont été (i) d'évaluer l'altération des propriétés physico-mécaniques sur des échantillons soumis à des essais dynamiques harmoniques en relation avec l'intensité du traitement et l'infra-densité ; (ii) de réaliser les analyses anatomiques sur le bois de 3 essences d'Eucalyptus et de qualifier l'influence de la densité ; (iii) d'évaluer les retraits totaux avant et après traitement.

2. RÉVISION BIBLIOGRAPHIQUE

2.1. Traitement Thermique

L'intérêt pour le traitement thermique comme processus de transformation du bois trouve son origine dans les études sur le bois torréfié ou rétifé (bois chauffé à haute température).

Conformément à Girard et Shah, cités par Pincelli (1999), les premières études sur ce processus sont apparues en 1930. Les qualités du bois torréfié alors obtenues ont permis le développement de la recherche et de sa production.

Brito (1992), cité par Brito et al (2006), a dit que l'action de la température dans le bois peut provoquer différents niveaux de transformations dans sa structure qui sont en rapport avec le phénomène de la pyrolyse (c'est la dégradation du bois par l'action de la température sans agents oxydants).

Ce processus est une manière de préserver le bois sans utilisation de produits chimiques. Il est à l'origine de changements importants dans le bois : la composition chimique élémentaire (cellulose, hémicellulose et lignine), la conductibilité électrique, la densité, la résistance mécanique et la coloration sont modifiés.

Avec l'augmentation de la température, les hémicelluloses commencent à être dégradées, il se crée également une pseudo-lignine qui est plus hydrophobe et rigide que l'originelle. Sachant que les hémicelluloses sont des molécules très hydrophiles, le bois rétifé présente peu de variations dimensionnelles et une humidité d'équilibre réduite. Ceci rend difficile le développement d'agents de dégradation du bois et minimise les tensions de croissance, souvent observées dans les essences d'Eucalyptus à cause de sa croissance rapide.

Conformément à Azevedo et Quirino (2006), le processus de réтификаion peut être appelé pyrolyse du bois (combustion contrôlée du matériau). L'intervalle de température nécessaire pour obtenir du bois torréfié se situe entre 200 °C et 280 °C. Le produit obtenu est solide, il a une grande puissance énergétique (pouvoir calorifique élevé), une grande durabilité et friabilité et, en revanche, présente une perte des propriétés mécaniques. Il est important de noter qu'il y a beaucoup de facteurs qui influencent le traitement, comme la durée, la vitesse de chauffage, l'atmosphère, l'humidité initiale du bois, entre autres.

Selon Rousset (2004), il faut retenir que pour l'ensemble des bois, le traitement thermique :

- entraîne des modifications chimiques qui sont principalement une dégradation des hémicelluloses, une réticulation des lignines (cross linking) et une modification de la cristallinité de la cellulose avec différents dégagements (CO₂, CO, H₂O, acide acétique, acide formique, méthanol, furfural...);
- modifie les propriétés physiques (diminution du taux d'équilibre hygroscopique) se traduisant par une amélioration de la stabilité dimensionnelle ;
- entraîne une fragilisation mécanique du matériau qui se traduit par une diminution de la résistance à

la flexion et une augmentation du module d'élasticité ;

- améliore globalement la résistance du bois aux agents biologiques de dégradation tels que les champignons responsables de la pourriture molle et fibreuse, les insectes (lyctus et capricorne) à l'exception des termites.

La réтификаction peut être réalisée en présence ou absence d'oxygène. Dans le premier cas, la température ne peut pas atteindre de valeurs excessives, car à partir de 300 °C le bois entre dans sa phase de carbonisation.

D'autre part, l'utilisation d'azote présente l'avantage de pouvoir réaliser des essais avec des températures plus élevées, car le taux d'oxygène est faible. Pour une température donnée, il est possible de comparer les deux types de traitement (avec azote et avec air). Azevedo et Quirino (2006) montrent également que des échantillons de bois soumis à des traitements en présence d'oxygène absorbent moins d'humidité que ceux réalisés en présence d'azote pur, car l'effet du traitement en présence d'oxygène est plus fort.

Pessoa (2002) mentionne certaines utilisations du bois rétifé : les revêtements, la fabrication de murs à l'épreuve du son, la parqueterie, les terrasses, le mobilier de jardins, les dormants et ouvrants de portes et fenêtres, la décoration, les instruments de musique... Si le bois est transformé en fragments, il peut être utilisé associé à du verre, des fibres et des matériaux collants. Le traitement modifie les surfaces en les rendant plus poreuses, ce qui est propice à une meilleure adhérence et imprégnation d'autres matériaux.

Avec autant d'utilités du bois rétifé, il est possible qu'une grande partie des produits issus du bois natif puissent être substitués par ceux du bois issu des plantations, au bénéfice de l'environnement. La figure 1 indique les produits issus du bois :

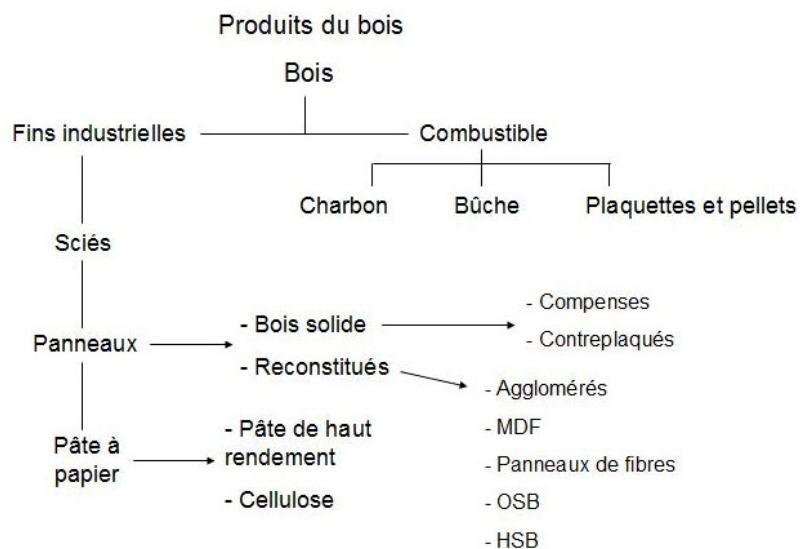


Figure 1 – Produits issus du bois

2.2. Anatomie du bois

Le bois est un ensemble de tissus aux parois lignifiées et aux différentes fonctions dans l'arbre : conduction de la sève, stockage, élaboration et transformation chimique des substances et support mécanique.

Les cellules, qui constituent ces tissus, sont formées à partir du cambium, qui se trouve entre le liber et l'aubier. Les cellules du cambium sont capables par leurs divisions de produire les divers types de cellule du tronc d'un arbre. Dans la partie intérieure, le cambium produit le xylème (responsable du transport de la sève brute). Il est divisé en : aubier (région fonctionnelle) et duramen (tissu mort), responsable du soutien mécanique. Le transport de sève brute est réalisé dans le sens racine-feuille. Dans la partie externe, le cambium produit le phloème, région de transport de la sève élaborée (est réalisé dans le sens feuille-racine).

Barber (1978) dit que dans le duramen, les vaisseaux sont bloqués par les gommés ou par les tyloses, bloquant le transport de la sève brute.

Parfois, il est possible de voir la différence entre le bois initial (ou de printemps) et le bois final (ou d'été). La croissance en diamètre du tronc se produit au niveau du méristème cambial ou latéral. Dans les périodes favorables, il y a la production du bois initial, qui est normalement la partie la plus large du cerne (grand diamètre des vaisseaux). En revanche, le bois d'été présente normalement une largeur inférieure du cerne (vaisseaux avec petits diamètres).

Une autre distinction possible est de différencier le bois juvénile et le bois adulte: le premier se situe près de la moelle, et le deuxième de la fin du bois juvénile jusqu'à l'écorce. Le bois juvénile est formé dans les premières années de croissance de l'arbre, quand il porte encore des branches vertes (figure 2).

Le bois juvénile est formé lors de la période de croissance rapide, il est constitué par des fibres courtes, les cernes sont plus larges et le bois présente une faible résistance (due aux caractéristiques des fibres et à la densité moins élevée). En revanche, le bois adulte est formé par le cambium après la perte de la fonction physiologique des branches, lors de la période de croissance plus lente. C'est la raison pour laquelle il est plus résistant et a une masse volumique plus élevée.

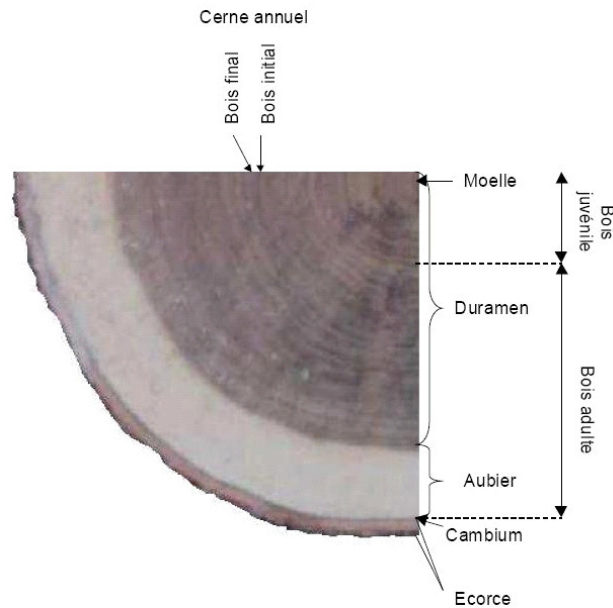


Figure 2 – Caractérisations macro et microscopique des régions du bois (Placet, 2006)

Étant donné qu'il existe beaucoup de différences et caractéristiques du bois dues à la croissance latérale, Tomazello (1985b) a observé pour le bois d'Eucalyptus des fibres plus proches de la moelle avec une longueur, largeur ainsi qu'une épaisseur de la paroi et un diamètre du lumen plus faibles. Les variations de ces éléments anatomiques conduisent à une structure hétérogène. Dans un autre article, Tomazello (1985a) mentionne qu'il est possible d'identifier des essences d'Eucalyptus en analysant les vaisseaux, rayons et parenchymes (différences anatomiques dues à la variabilité génétique).

Rocha et al (2004) disent que pour l'*E. grandis* la longueur des fibres varie en fonction de la hauteur. Ils ont également trouvé que les dimensions des fibres sont plus élevées dans le premier quart et plus faibles dans le dernier quart de la hauteur du tronc exploitable de l'arbre. Les données d'épaisseur des fibres ne sont pas statistiquement différentes.

Pour étudier le bois, il est très important de connaître les plans d'études : plan transversal (coupe perpendiculaire au tronc ou à la croissance en hauteur) ; plan longitudinal radial (coupe parallèle dans la direction des rayons) ; plan longitudinal tangentiel (coupe perpendiculaire aux rayons ou tangentiellement aux cernes de croissance).

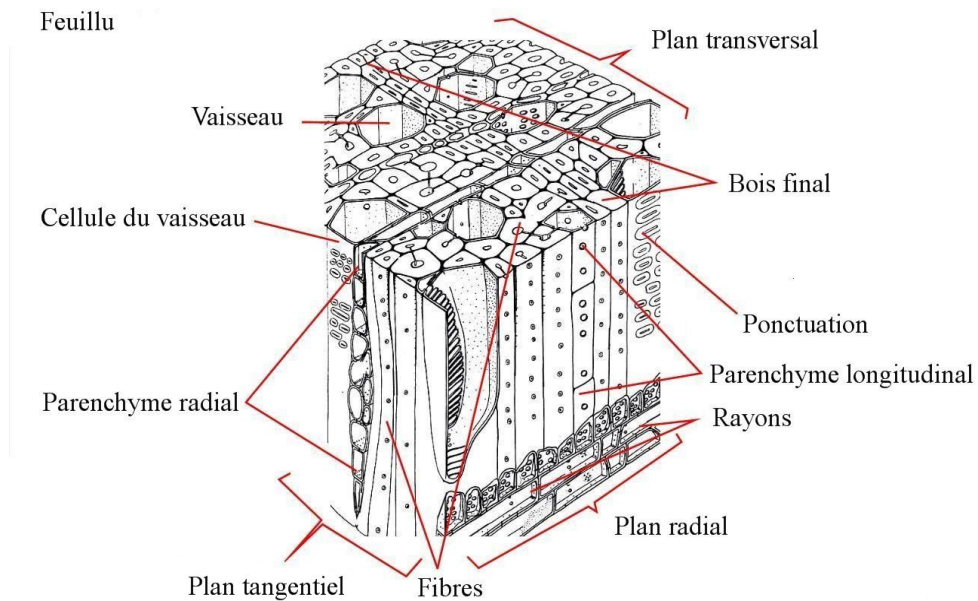


Figure 3 – Plans d'étude et structure anatomique d'un bois de feuillu (Dendrologie, Anatomie et Identification des bois – ESALQ/USP, 2005)

Sur la figure 3, il est possible de voir que le bois de feuillu est constitué principalement par des vaisseaux, fibres et cellules de parenchyme. Les premiers sont responsables de la conduction de la sève brute, les fibres ont un rôle de support mécanique de l'arbre et les cellules du parenchyme servent au stockage de substances de réserve. Les feuillus sont plus évolués que les résineux, ils présentent des cellules plus spécialisées et, par conséquent, une structure anatomique du bois plus complexe.

La constitution anatomique des bois est le résultat d'un phénomène d'empilement de couches de cellules à l'intérieur d'une base génératrice. La paroi des cellules est composée par divers types de couches et de sous-couches. Normalement, il est possible de distinguer une couche intercellulaire quand on suit les parois primaires et secondaires (figures 4 et 5). La couche intercellulaire est une membrane fine qui soude les cellules les unes aux autres. La paroi primaire est très fine et mince, elle est formée après la division cellulaire. La paroi secondaire constitue la partie de la cellule qui présente la plus grande résistance mécanique, elle est formée par le dépôt de molécules de cellulose avec sous-couches appelées :

- Couche externe (S1) : sa structure est lamellaire, elle représente 5 à 10 % de l'épaisseur totale de la membrane, son épaisseur varie de 0,1 à 0,35 μm . Les microfibrilles de cellulose sont disposées en hélice avec une orientation variable et alternée. Cette structure en réseau croisée explique en partie la forte résistance à la traction transversale et le retrait dans le sens longitudinal.
- Couche centrale (S2) : c'est la partie la plus volumineuse de la paroi. Elle est formée d'une organisation dense de lamelles de microfibrilles de cellulose, en hélices parallèles, dont l'angle (α) par rapport à l'axe de la cellule est compris entre 5 et 30°. L'épaisseur de S2 varie de 1 à 10 μm et représente ainsi 75 à 85 % de l'épaisseur totale de la paroi cellulaire.

- Couche interne (S3) : elle est relativement mince et aussi constituée de plusieurs microlamelles où les microfibrilles sont moins parallèles et dont l'angle est élevé.

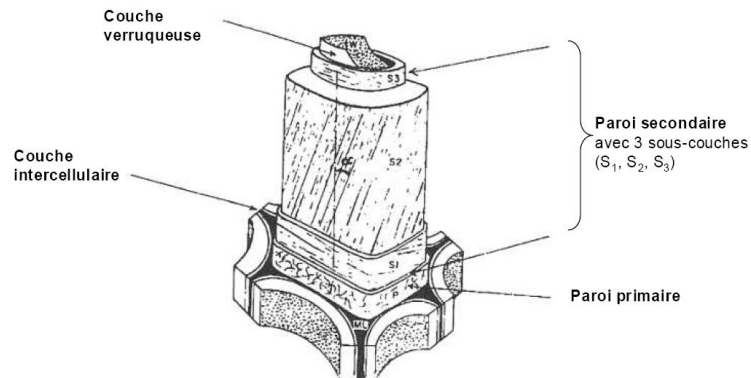


Figure 4 – La structure de la paroi cellulaire et ses fibres et trachéides (Arbolor 1994, cité par Placet 2006)

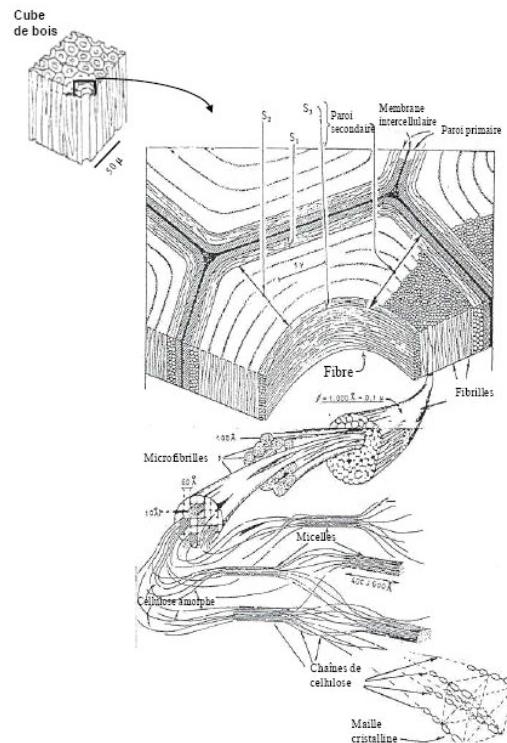


Figure 5 – Structure de la paroi secondaire : molécules de cellulose (Placet, 2006)

2.3. Propriétés physico-mécaniques du bois d'Eucalyptus

Il y a de nombreuses études réalisées avec pour objectif la détermination des facteurs qui influencent directement les propriétés physico-mécaniques du bois d'Eucalyptus. Evans et al (2000) présentent comme facteurs d'influence : la densité basale, le pourcentage de bois juvénile, la largeur des cernes, l'angle des microfibrilles, l'inclinaison du fil, la teneur en eau, l'intensité des attaques

d'insectes ainsi que le type, la localisation et l'exposition du bois à la température. Il est également possible d'observer ces facteurs d'influence entre deux clones et deux sites différents (Tomazello Filho, 1985a).

Parmi les diverses propriétés mécaniques du bois, le test de flexion est fondamental pour les applications du bois en structures (les charpentes, poutres, poteaux), pour les caisses, les parquets, les meubles...

Pour réaliser les essais de flexion, il est important d'établir une valeur de teneur en eau du bois, sachant qu'il y a une influence de cette teneur pour les échantillons au-dessous du point de saturation des fibres (PSF). Conformément à Skaar (1972), l'humidité relative, la température, l'essence du bois, la présence et la quantité de composants accidentels ainsi que les tensions mécaniques ont une influence sur l'humidité d'équilibre du bois (les deux premiers facteurs sont les plus importants).

De plus, la densité exerce également une influence sur la résistance mécanique du bois. Lobão et al. (2004) disent que les variations des propriétés physico-mécaniques du bois d'Eucalyptus sont liées à la densité. Plusieurs auteurs affirment que la résistance du bois est directement proportionnelle à sa densité. Cette densité est en relation avec la taille et la forme des cellules (l'épaisseur de la paroi, le pourcentage de bois initial et final et les rayons ligneux).

2.3.1. Rhéologie des solides

La rhéologie est une partie de la physique qui étudie la plasticité, l'élasticité, la viscosité et la fluidité caractéristiques des corps déformables.

Contrainte et déformation – En physique, l'effort exercé sur une pièce est représenté par la force F , exprimée en newton (N). La variation dimensionnelle est une longueur, exprimée en mètres. Cependant, ceci dépend de la forme de la pièce. Si l'on s'intéresse aux propriétés du matériau, il faut s'abstraire des dimensions de la pièce. On caractérise donc l'effort par la contrainte et la variation dimensionnelle par la déformation.

- Contrainte – Si S est la surface sur laquelle s'exerce la force F , on définit la contrainte σ :

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

La surface dépend de la déformation, mais pour les petites déformations, ceci est souvent négligeable.

- Déformation – Si L_0 est la longueur initiale de la pièce et L la longueur finale, alors la déformation ε est définie comme suit (sans unité) :

$$\varepsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \right) = \ln \left(\frac{1 + \Delta L}{L_0} \right)$$

Si la contrainte est faible alors la déformation est faible, donc égale à l'allongement relatif.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Viscoélasticité - La viscoélasticité d'un corps dépend de sa température et du temps de repos. Les corps idéalement élastiques présentent une réversibilité entre contrainte et déformation parfaite (il n'y a pas d'effet mémoire du matériau). Les relations entre contrainte et déformation sont instantanées et linéaires. Il n'y a aucune dissipation d'énergie. En revanche, pour les corps idéalement visqueux, l'énergie est totalement dissipée sous forme calorifique.

Comportement viscoélastique du bois - Le comportement viscoélastique d'un matériau trouve son origine dans la nature des polymères qui le constituent. Quand un matériau est soumis à une force ou contrainte, il répond immédiatement au déplacement et à la déformation, auxquels se succéderont un réajustement moléculaire. Dans le cas du bois, cette propriété peut varier en fonction de la température, de la fréquence et de l'humidité de l'échantillon (Berrada, 1991) (figure 6). Pour la plupart des polymères, il existe une température appelée "température de transition vitreuse" (figure 7). Celle-ci indique le point où le polymère passe de son état vitreux à l'état élastique. Cette température est directement associée à la flexibilité des chaînes macromoléculaires, la taille et la polarité des groupes latéraux ainsi que la masse moléculaire (Perré et al, 2004).

Il y a deux groupes de polymères différents : les homogènes et les hétérogènes. Le premier est caractérisé par la présence d'un seul type de polymère et le deuxième par plusieurs. Le bois est hétérogène, il est constitué par trois polymères différents (Figure 8) : la cellulose, homopolymère linéaire de grandes chaînes amorphes ; l'hémicellulose, polymère amorphe ramifié de chaînes plus courtes ; la lignine, polymère amorphe, complexe et sans forme définie. Certains auteurs (Ehrenstein et Monagne (2004) cités par Perré et al. (2004)) disent que les propriétés physico-mécaniques d'un polymère hétérogène peuvent être intermédiaires, meilleures ou moins bonnes que les caractéristiques des polymères originels le constituant.

Le travail de Kelley et al (1987) montre, par des essais avec un Analyseur mécanique dynamique (DMA) et un Calorimétrie à balayage différentiel (DSC), qu'il existe beaucoup de transitions du bois, dues aux différents polymères qui le constituent. Ainsi, Placet (2006) affirme que le bois est un polymère hétérogène multitransitionnel et cite Dwianto et al. (1998), qui ont observé une zone de transition de ramollissement du bois à 180 °C, attribuée à la décomposition des hémicelluloses.

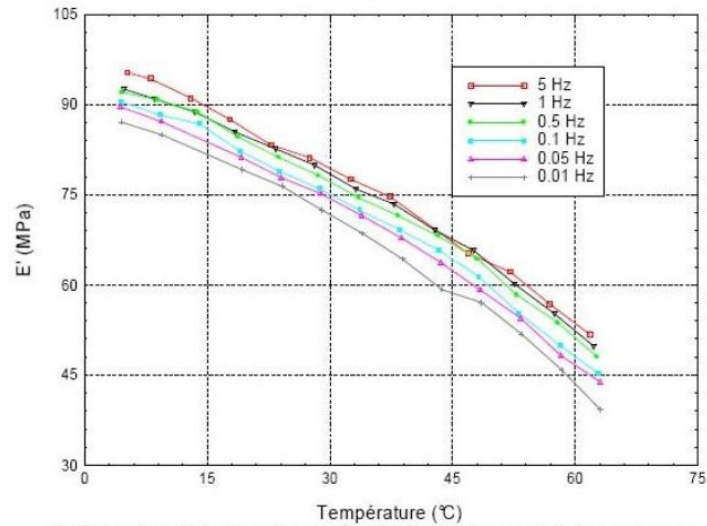
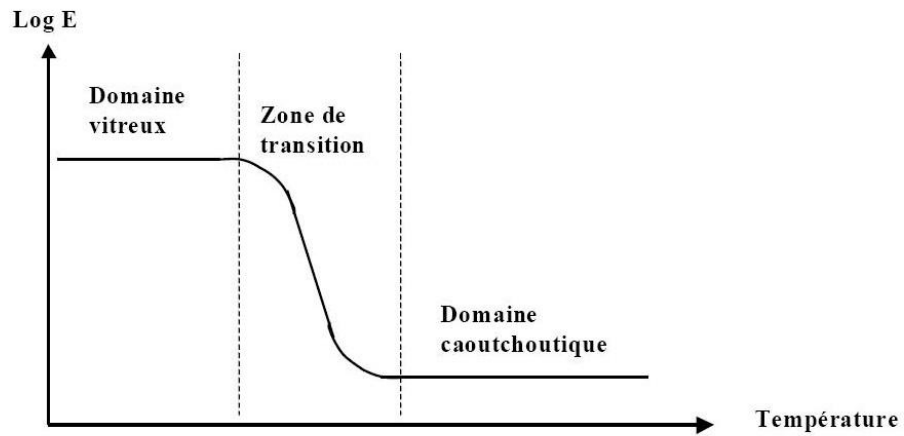


Figure 6 - Influence de la fréquence (Placet, 2006)



Les domaines d'état des matériaux viscoélastiques

Figure 7 – Influence de la température et zone de transition vitreuse

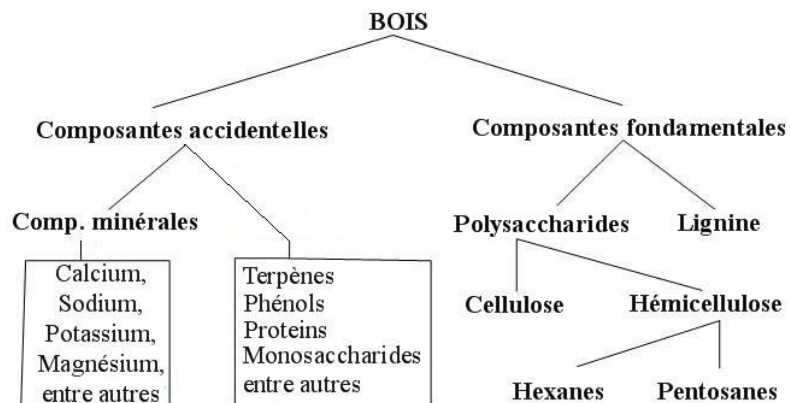


Figure 8 – Composition chimique du bois (Fondements et applications de la chimie du bois – ESALQ/USP, 2006)

2.3.2. Caractérisation des propriétés viscoélastiques dans les essais harmoniques (Placet, 2006)

Les essais harmoniques consistent à faire varier la température d'un polymère avec une déformation périodique et une fréquence constante, comme le réalise le DMA. L'avantage de ce type d'essai est la relation entre temps et température.

Pour déterminer le comportement rhéologique d'un matériau, il est nécessaire d'établir à chaque instant une relation entre l'état de contrainte (σ) et l'état de déformation (ϵ). En pratique, l'échantillon est soumis aux efforts et on mesure les déplacements. Le passage de l'information globale (force et déplacement) à l'information locale (contrainte et déformation) dépend du mode de déformation et de la géométrie de l'échantillon.

La particularité des essais harmoniques réside dans le fait qu'efforts et déplacements sont des fonctions sinusoïdales qui possèdent la même fréquence f mais qui sont déphasées d'un angle δ . En régime établi, la déformation et la contrainte représentent respectivement la partie réelle des fonctions complexes ϵ^* et σ^* (Figure 9).

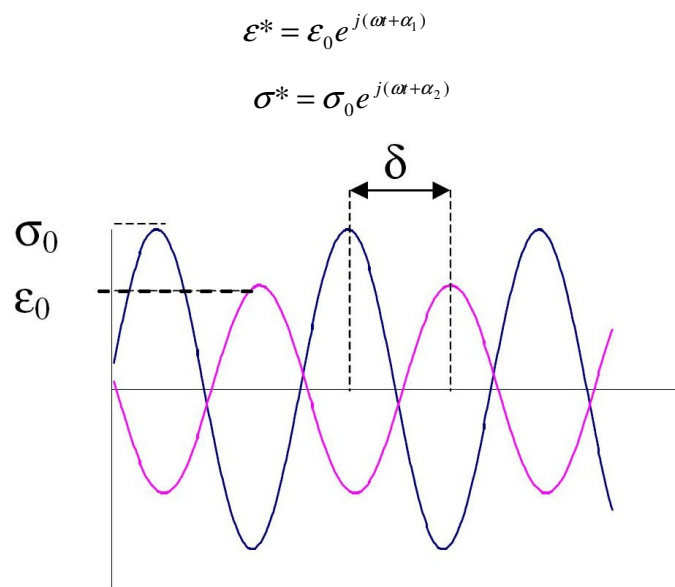


Figure 9 – Formulation complexe des fonctions de contrainte et de déformation (Placet, 2006)

Par analogie avec la loi de Hooke dans une direction donnée, il est possible d'écrire la relation suivante :

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\epsilon^*}$$

$$E^* = E_0 e^{j\delta} \quad \text{avec : } \delta = \alpha_1 - \alpha_2 \quad \text{et} \quad E_0 = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0}$$

A partir des mesures de δ et E_0 , il est possible de calculer le module de stockage (E') et le module de perte (E'').

$$E^* = E' + iE'' \quad \text{avec : } E' = E_0 \cos \delta \quad \text{et} \quad E'' = E_0 \sin \delta$$

Le coefficient de perte ($\tan \delta$) est directement relié aux propriétés viscoélastiques et s'exprime comme suit :

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'}$$

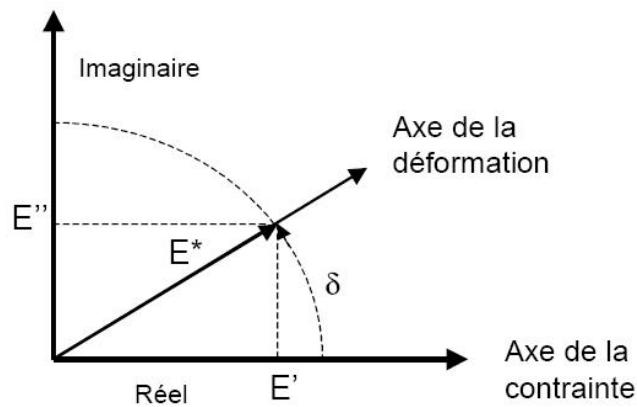


Figure 10 – Représentation d'un plan complexe (Placet, 2006)

Pour un solide élastique parfait, le déphasage δ entre la contrainte et la déformation est nul. Pour un fluide newtonien, le déphasage est égal à 90° . Pour un matériau viscoélastique, il sera compris entre 0° et 90° (figure 10). Dans le cas du bois, il dépend de la fréquence, de la température et de la teneur en eau. Les modules de stockage et perte s'expriment en pascal (Pa). Le $\tan \delta$ est la capacité d'amortissement du matériau viscoélastique. Les zones de transition vitreuse et de ramollissement, s'accompagnent d'une augmentation significative de la capacité d'amortissement du matériau viscoélastique.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1. Caractéristiques des essences forestières

Eucalyptus grandis (figure 11)

Cette espèce est originaire d'Australie, du nord de l'État de Nouvelle Galles du Sud, au sud du Queensland (proche de la région côtière et dans la partie centrale), et du nord du Queensland en altitude de 300 à 900 m. La pluviométrie annuelle varie de 1 000 à 1 700 mm/an. La période maximale de sécheresse qu'il supporte est de 3 mois. La température moyenne des mois les plus chauds varie de 29 à 32 °C, tandis que pour les mois les plus froids, elle est de 5 à 6 °C (Ferreira, 1979) (il gèle parfois dans les régions plus intérieures). Le travail du bois d'*E. grandis* est simple, il est souvent utilisé comme bois de construction s'il provient de plantations à cycles longs (plus que vingt ans). Le bois produit en cycles courts (environ sept ans) est utilisé pour la fabrication de caisses. Normalement, le bois originaire des arbres à croissance rapide présente des problèmes de gauchissement, de contractions et de fentes. Les plantations avec un bon traitement sylvicole peuvent produire du bois d'excellente qualité (pour la scierie et le déroulage). *E. grandis* est la principale source de matière première pour les industries de la cellulose et du papier de l'État de São Paulo (Brésil). Barrichelo et Brito (1977) ont trouvé une teneur de lignine de 26,7 % pour cette espèce et Raad (2006) de 23,78 %.

Tableau 1- Propriétés physico-mécaniques et anatomiques du bois d'*E. grandis*

Propriétés mécaniques *			Unité	Propriétés physiques*		Unité
Résistance – Module de rupture à flexion statique				Densité basale	420	kg/m ³
BV (Bois Vert)	53,8	MPa		Densité (15 %)	500	kg/m ³
Bois 15 % Humid.	75,6	MPa		Retrait Radial	5,3	%
Lim. de proportionnalité BV	-	MPa		Retrait Tangenciel	8,7	%
MOE BV	9 689	MPa		Retrait Volumique	15,7	%
Résistance – Compression parallèle aux fibres				Propriétés anatomiques*		
BV	26,3	MPa		Couches de croissance	Distinctes	
Bois 15 % Humid.	42,1	MPa		Vaisseaux	Peu	
Lim. de proportionnalité BV	19,7	MPa		Rayons ligneux	Fines	
MOE BV	11572	MPa		Parenchyme	Paratrachéal	
Coefficient d'influence de humid.	-	%		Fibres**	Prédominance de courtes	

* IPT (2003); ** Tomazello (1985a);



Figure 11 – Aspects de la plantation d'*E. grandis*

***Eucalyptus saligna* (figure 12)**

Cette espèce est originaire de la région des vallées des chaînes montagneuses proches du littoral de Nouvelle Galles du Sud, et du sud du Queensland. Sa distribution naturelle se situe entre les latitudes de 28 et 35 °S et à des altitudes inférieures à 1 000 m. La pluviométrie annuelle varie de 800 à 1200 mm/an. Il pleut régulièrement pendant l'année ou majoritairement durant l'été. Les périodes de sécheresse ne dépassent pas 4 mois. La température moyenne en été est de 28 à 30 °C et celles d'hiver de 3 à 4 °C. Il gèle de 5 à 10 jours par an. Le bois possède de multiples usages : déroulage, meubles, structures, caisses, poteaux, chevalements, cellulose et charbon. Il est peu résistant aux fortes gelées et possède une grande capacité de régénération. Fréquemment, cette essence est confondue avec l'*E. grandis*, car elles possèdent beaucoup de similitudes. Barrichelo et Brito (1977) ont trouvé un teneur de lignine de 26,5 % pour cette espèce.

Tableau 2- Propriétés physiques et anatomiques du bois d'*E. saligna*

Propriétés physiques**		Unité	Propriétés anatomiques*	
Densité basale	470	kg/m ³	Couches de croissance	-
Densité (15%)	-	kg/m ³	Vaisseaux	Nombreux
Retrait Radial	7,67	%	Rayons ligneux	Nombreux
Retrait Tangentiel	14,83	%	Parenchyme	Aliforme
Retrait Volumique	26	%	Fibres	Courts et étroits

* Tomazello (1985b) ; ** Oliveira et Silva (2003)



Figure 12 – Aspects de la plantation d'*E. saligna*

***Corymbia (Eucalyptus) citriodora* (Figure 13)**

Cette espèce est originaire du centre du Queensland. Les secteurs de plus grandes concentrations sont situés entre les latitudes de 15,5 et 25°S, pour des altitudes comprises entre 80 à 800 m. La pluviométrie moyenne annuelle est de 625 à 1 000 mm/an. La température moyenne en été est de 29 à 35 °C et en hiver de 5 à 10 °C. La période de sécheresse varie de 5 à 7 mois, dans l'époque la plus chaude de l'année. Il gèle rarement dans l'aire naturelle de cette espèce. Le bois est utilisé pour les constructions, structures, caisses, poteaux et charbon. Dans les sols pauvres, il est possible de trouver des arbres fourchus (dû à une déficience nutritionnelle, surtout carence en bore) ; cette espèce a un bon potentiel de régénération. Barrichelo et Brito (1977) ont trouvé un teneur de lignine de 21,1 % pour cette espèce et Raad (2006) 23,40 %.

 Tableau 3 - Propriétés physico-mécaniques et anatomiques du bois d'*C. citriodora*

Propriétés mécaniques *		Unité	Propriétés physiques*		Unité
Résistance – Module de rupture à flexion statique			Densité basale	1040	kg/m ³
BV (Bois vert)	111,8	MPa	Densité (15 %)	867	kg/m ³
Bois 15 % Humid.	121,4	MPa	Retrait Radial	6,6	%
Lim. de proportionnalité BV	33,7	MPa	Retrait Tangenciel	9,5	%
MOE BV	13337	MPa	Retrait Volumique	19,4	%
Résistance – Compression parallèle aux fibres			Propriétés anatomiques*		
BV	51,1	MPa	Couches de croissance	Peu distinctes	
Bois 15 % Humid.	62,8	MPa	Vaisseaux	Peu	
Lim. De proportionnalité BV	33,7	MPa	Rayons ligneux	Fines; peu	
MOE BV	15867	MPa	Parenchyme	Aliforme	
Coefficient. d'influence de humid.	4,7	%	Fibres	-	
* IPT (2003)					


 Figure 13 – Aspects de la plantation de *C. citriodora*

3.2. Échantillonnage

Les échantillons ont été sélectionnés dans des arbres issus de plantations d'Eucalyptus localisées dans la Station Expérimentale d'Anhembi (Département de Sciences Forestières – ESALQ/USP). Les critères retenus lors de la sélection des arbres furent : inexistence de symptômes de maladies et de défauts de croissance (fourches, fil torse), arbres de DHP (Diamètre à hauteur du poitrine) semblable, ainsi que arbres de bordure, dominants et dominés ont été éliminés. Les arbres ont été plantés en 1975 et coupés en février 2007, il n'a pas été possible d'obtenir des valeurs d'espacement entre les arbres, à cause des éclaircies successives.

3.3. Localisation et caractérisation du secteur expérimental

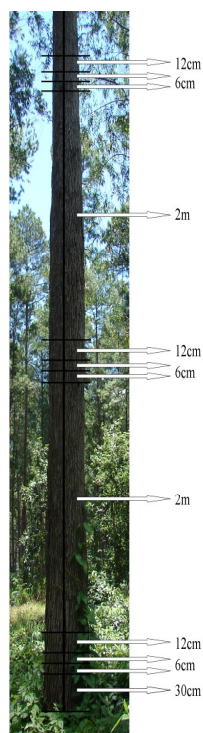
La Station Expérimentale d'Anhembi fait partie de l'Université de São Paulo (USP). Celle-ci est sous l'administration du Département de Sciences Forestières, de l'ESALQ. Elle se situe à 15 km du périmètre urbain de la ville d'Anhembi et à 95 km de Piracicaba (figure 14). Sa superficie est de 500 ha et tout est destiné à l'expérimentation forestière, avec essences exotiques et natives. L'implantation des projets forestiers a commencé en 1975. Actuellement, il y a 170 projets en développement. Les coordonnées géographiques sont : une latitude de 22° 40' S, une longitude de 48° 09' N et une altitude de 500 m ; le relief est plan ou doucement ondulé et les sols sont des podzols, sablonneux et profonds. Les étés sont chauds et pluvieux et les hivers froids et secs. La température moyenne annuelle est de 21 °C (mois le plus froid : 17,1 °C ; mois le plus chaud : 23,7 °C). La pluviométrie moyenne annuelle est de 1350 mm/an avec un déficit hydrique annuel de 20 mm. Les gelées sont rares.



Figure 14 – Localisation de la ville d'Anhembi dans l'État de Sao Paolo

3.4. Sélection des arbres et coupe des échantillons de la rondelle

Après les critères déjà mentionnés, trois arbres de chaque espèce ont été sélectionnés : *Eucalyptus grandis* (Arbres 1, 2 et 3), *Eucalyptus saligna* (Arbres 4, 5 et 6) et *Corymbia citriodora* (Arbres 7, 8 et 9). Nous avons ensuite réalisé une coupe transversale à 30 cm de la hauteur du tronc par rapport au sol des neuf arbres et coupé sur chaque arbre six disques de 6 cm d'épaisseur, trois disques de 12 cm d'épaisseur et deux rondins de 2 m de longueur (figure 15). Les disques des bois de plus grande épaisseur ont été utilisés pour les analyses de ce travail (figure 16). Un barreau de 15 cm de largeur a été coupé sur chaque disque (centré sur le diamètre, avec la moelle au centre : 7,5 cm de chaque côté). On a évité les parties présentant des défauts, pourritures et variations d'épaisseur des cernes. Le seul barreau qui présentait du bois de réaction et des champignons était le numéro 8. Les barreaux de bois de 12 cm d'épaisseur ont été coupés au milieu. Ils présentaient alors les dimensions finales de : DHP x 15 x 6 cm (longueur, largeur, épaisseur). La moitié des barreaux de 6 cm d'épaisseur issus de la base de l'arbre ont été apportés en France. Ces barreaux ont été soumis à des traitements d'expurgation (avec bromure de méthyle), conformément aux règles internationales.



(15)



(16)

Figure 15 – Échantillonnage des disques des arbres d'Eucalyptus et de Corymbia

Figure 16 – Disques d'*E. grandis* : variation diamétrale en fonction de la hauteur de découpe du tronc (de gauche à droite : 0,42 m ; 2,78 m et 5,02 m)

3.5. Masse volumique basale du bois

Deux parallélépipèdes pour chaque disque (2 x 2 x 1,5 cm, la dernière valeur dans la direction longitudinale) ont été utilisés pour la détermination de la densité basale. Ces parallélépipèdes ont été saturés d'eau dans un système à vide pour obtenir leur volume saturé, par la méthode d'Archimède. Les cubes ont ensuite été mis dans une étuve (103 °C, 2 jours) pour connaître leur masse anhydre. Pour la détermination de la densité anhydre moyenne par arbre et par essence, on a appliqué la formule suivante :

$$D_b = M_0 / V_s$$

Où : D_b = masse volumique basale (g/cm³); M_0 = masse anhydre (g); V_s = volume saturé en cm³ (plus de 30 % d'humidité).

Pour le calcul de densité de chaque échantillon soumis au traitement du DMA, on a pris les trois dimensions en utilisant un pied à coulisse afin de calculer le volume anhydre, puis on a ensuite utilisé une balance pour calculer la masse anhydre. Pour la détermination de la densité on a appliqué la dernière formule.

3.6. Analyses anatomiques et physiques du bois

3.6.1. Pourcentages de duramen, d'aubier et d'écorce

Quatre diamètres du duramen, quatre de l'aubier et quatre de l'écorce ont été mesurés avec un angle de 45° dans les différents disques de bois des arbres (figure 17), afin de déterminer les moyennes et les pourcentages de chaque partie.

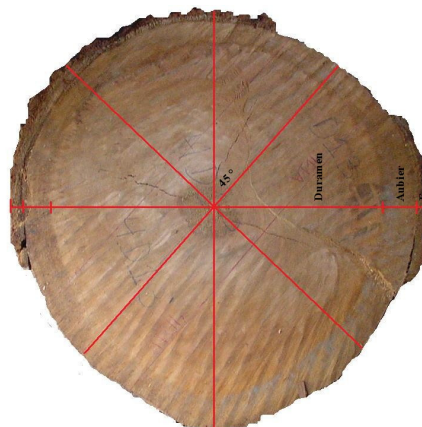


Figure 17 – Section transversale d'un disque et lignes de démarcation pour la mesure des parties du duramen, de l'aubier et de l'écorce

3.6.2. Analyses microscopiques

Les images microscopiques des arbres ont été réalisées avec un microscope électronique à balayage environnemental (MEBE), dans les sections transversales des échantillons de trois arbres (*E. grandis*, arbre 2 ; *E. saligna*, arbre 5 ; *C. citriodora*, arbre 8), avec l'intention d'étudier leur structure anatomique naturelle avant le traitement thermique.

3.6.3. Variation du volume du bois, dans le sens moelle-écorce

Des échantillons (TRL = 10 x 12 x 50 mm) ont été découpés (figure 18) à partir des barreaux (voir item 4.3) issus des disques d'un arbre de chaque essence (*E. grandis* – Arbre 2 ; *E. saligna* – Arbre 4 ; *C. citriodora* – Arbre 8). Ce choix s'est basé sur les barreaux qui ne possédaient pas de fentes. Ils ont ensuite été polis avec de l'eau (afin d'obtenir un bon état de surface et des mesures précises). S'en est suivie une saturation grâce à un système à vide pour s'assurer d'une teneur en eau plus grande que le PSF. On a alors pris des mesures dans les directions radiales et tangentielles (3 points différents) avec un micromètre (précision de 0,01 mm). Les 6 points de mesure ont été préalablement marqués afin d'être sûr d'effectuer les mesures au même endroit. Les échantillons ont ensuite été séchés dans les conditions ambiantes du laboratoire, afin d'obtenir les nouvelles mesures à l'état sec à l'air (H = 12 %) et ils ont ensuite été mis dans l'étuve (103 °C, 2 jours) afin d'obtenir les dimensions anhydres. Enfin, ils ont été placés dans une seconde étuve qui permet le traitement thermique à 220 °C pendant 5 heures, on a alors pris les mesures. À chaque étape, les masses des échantillons ont été notées (annexe 1 – Photographies des 3 barreaux de bois avec la localisation des échantillons).

La densité anhydre de chaque échantillon a été calculée afin d'établir une relation avec la variation du volume. La formule utilisée fut :

$$D_0 = M_0/V_0$$

Où : D_0 = Densité anhydre (g/cm³) ; M_0 = Masse anhydre (g) ; V_0 = Volume anhydre (cm³)

Les retraits (radial, tangentiel, volumique, de l'état vert jusqu'à l'état anhydre, puis de l'état anhydre jusqu'à la fin du traitement thermique) et le facteur d'anisotropie ont été calculés pour tous les échantillons par les formules :

$$\beta_{\text{total}} = ((D_{\text{vert}} - D_{\text{anhydre}})/D_{\text{vert}}) \times 100 ; \quad \beta_v = (\beta_t + \beta_r - \beta_t \times \beta_r) \times 100 ; \quad \text{FA} = \beta_t/\beta_r ;$$

Où: β_{total} = retrait Radial (r) ou Tangentiel (t) (%) ; D_{vert} = Dimensions moyennes radiales ou tangentielles à l'état vert ou avant le traitement (mm) ; D_{anhydre} = Dimensions moyennes radiales ou

tangentielles anhydres ou après le traitement (mm) ; β_v = Retrait Volumique (%) ; FA = Facteur anisotrope (adimensionnel).

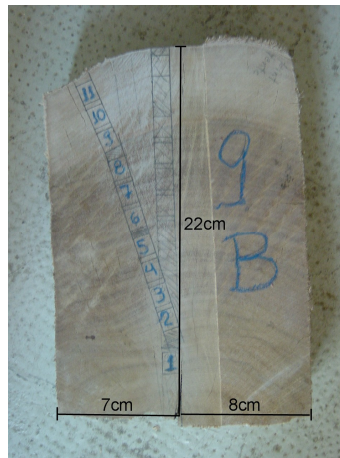


Figure 18 – Section transversale d'un barreau : échantillon marqué dans le sens radial

3.7. Analyse des propriétés physico-mécaniques du bois avec le DMA 2980

3.7.1. Description du DMA (Analyseur mécanique dynamique)

Le DMA (figure 19) est utilisé pour les essais mécaniques des matériaux viscoélastiques, car il permet une variation de la fréquence et de la température au cours du temps. Il permet la détermination des zones de transition des matériaux (Perré, 2006). Ses grands avantages, par rapport aux autres modèles, sont : un système de guidage par palier à air qui élimine toute possibilité de torsion, un capteur de déplacement pour mesurer la déformation de l'échantillon se produisant sous l'action de la force appliquée et un moteur d'entraînement direct sans contact qui supporte une variation de température et permet de fournir une force sinusoïdale qui déforme l'échantillon. Ses spécifications techniques essentielles sont : (i) température de 25 à 600 °C ; (ii) fréquence ajustable de 0,01 à 200 Hz ; (iii) force de 0,0001 à 18 N ; (iv) amplitude de la flèche de $\pm 0,5$ à $\pm 10\ 000$ μm et (v) sensibilité de $\tan \delta$ de 0,0001.

L'équipement est piloté par un logiciel qui permet de réaliser plusieurs types d'essais tout en contrôlant la température et la fréquence. Ce type d'essai est parfaitement adapté au suivi des propriétés viscoélastiques durant le traitement thermique. Un essai typique consiste à déshydrater l'échantillon dans une étuve à 103 °C, il y a ensuite maintien de la température du four à 100 °C pendant 30 min (afin de s'assurer que l'échantillon est complètement sec). Enfin, la température est amenée jusqu'à la valeur désirée en mode multifréquence.



Figure 19 – DMA : aspects généraux de l'appareil

3.7.2. Mors de flexion trois points du DMA

Ce type de mors (figure 20) est extrêmement utile pour étudier les matériaux rigides et hautement élastiques tels que les métaux, les céramiques, quelques types de polymères et des essences de bois. Utilisé dans les essais d'oscillation, ce mors nécessite l'emploi d'une force statique (précontrainte). Ce dispositif ne peut pas être utilisé sur les échantillons qui ne supportent pas une force de précontrainte, tels que les élastomères. Le petit mors de flexion 3 points a été choisi car il présente des rouleurs qui permettent un retrait du matériau.

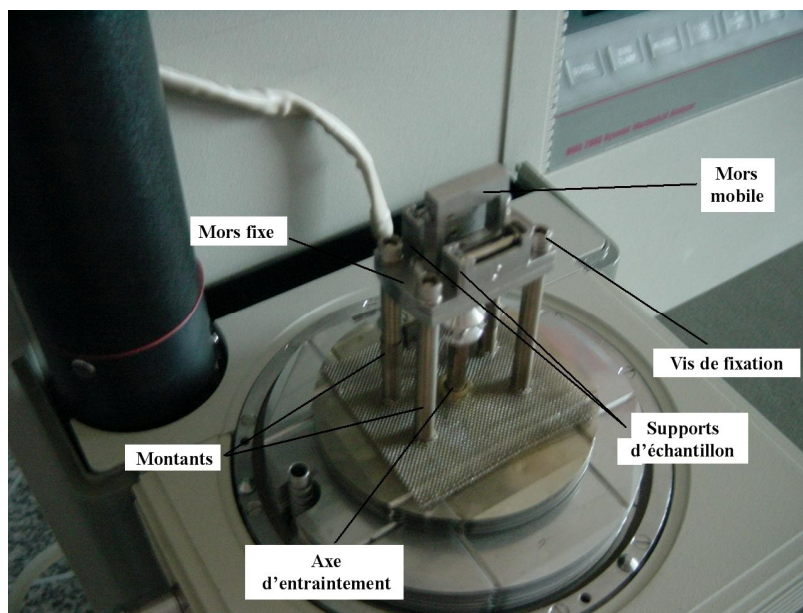


Figure 20 – DMA : mors de flexion 3 points

3.7.2.1. Limites d'utilisation du mors de flexion trois points

Afin de définir ces limites, il existe une équation qui définit la taille des échantillons. Elle permet également de déterminer si les propriétés d'un échantillon d'une taille donnée sont mesurables, ou s'il convient de le redimensionner. Les tailles possibles des échantillons se calculent sous forme de facteurs géométriques (GF) dans l'équation ci-après. La plage de module (figure 21) est basée sur celle de la rigidité dans laquelle le DMA 2980 fonctionne (de 10^2 à 10^7 N/m).

$$GF = \frac{L^3}{48 \cdot I} \cdot \left[1 + \frac{12}{5} \cdot (1 + \nu) \cdot \left(\frac{t}{L} \right)^2 \right]$$

Où : L = longueur de l'échantillon (mm) ; I = Moment géométrique (mm^4) = $1/12 t^3 W$ pour les échantillons rectangulaires ; t = Épaisseur de l'échantillon (mm) ; W = Largeur de l'échantillon (mm) ; ν = Coefficient de Poisson (théoriquement 0,44)

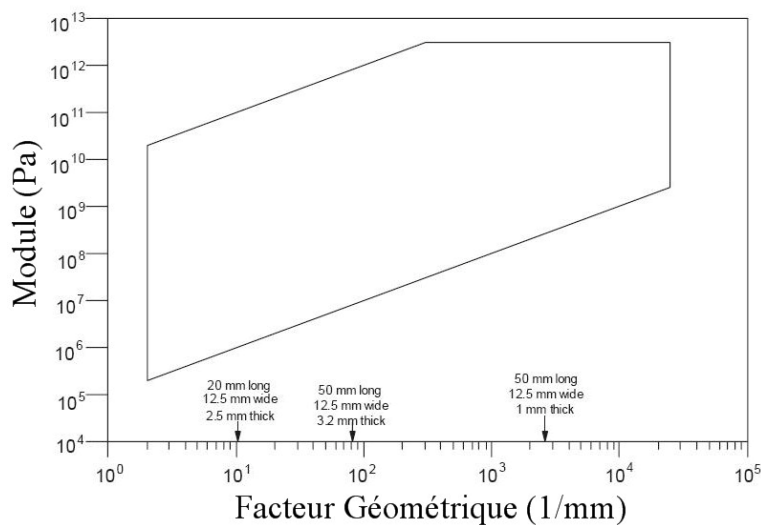


Figure 21 – Plage de fonctionnement du mors de flexion 3 points (Référence : Analyseur Mécanique Dynamique Manuel d'utilisation, Vol. 2)

3.7.2.2. Préparation des échantillons pour un mors de flexion 3 points

La préparation de l'échantillon est l'une des étapes les plus importantes pour obtenir des valeurs de modules à la fois exactes et reproductibles. Dans l'idéal, les échantillons doivent être moulés, usinés ou fabriqués, mais sous forme rectangulaire lorsqu'on utilise un mors de flexion 3 points. Le mors de flexion 3 points est très sensible aux irrégularités de l'échantillon, c'est pourquoi le rectangle doit être régulier. L'épaisseur maximale est de 7 mm et doit être aussi uniforme que possible,

avec une tolérance maximale de 0,02 mm. Il est vraiment important que l'épaisseur soit uniforme car cette valeur est utilisée dans le calcul du module et une erreur de 3 % en épaisseur devient une erreur de 10 % dans le module calculé. La largeur du rectangle doit être comprise entre 5 et 15 mm (la tolérance est aussi de 0,02 mm). La longueur doit être de 5 mm plus longue que la distance qui sépare les supports du mors, mais, il est très important de s'assurer que les échantillons ne touchent pas les parois du four. Afin de réaliser ceux qui devaient être utilisés dans cet essai, on a utilisé les autres parties des barreaux qui étaient en France (voir item 4.3) (utilisant une coupe radiale, c'est pourquoi le cerne était perpendiculaire à la longueur des échantillons, principalement au milieu, car c'est là que se situe le point de flexion du mors). Les défauts (les échantillons irréguliers, mal coupés et le bois de mauvaise qualité) et l'inclinaison du fil ont été évités et tous les échantillons ont été extraits des mêmes cernes pour qu'ils soient le plus homogènes possibles (dans le duramen et proches de l'aubier) (annexe 2 – Photographies des barreaux de bois avec la localisation des échantillons). Les coupes radiales et longitudinales ont été faites avec une scie circulaire. Des blocs de largeur 13 mm et longueur 36 mm et de hauteur variable ont été obtenus. Pour la dernière coupe (3 mm d'épaisseur), une microtrouçonneuse modèle Struers Accutom-5 (figure 22), qui permet une coupe très précise, a été utilisée, avec une vitesse de rotation de la scie de 3000 tours/minute et vitesse d'approche du porte échantillon en direction de la lame de 1 mm/sec. Enfin, les échantillons ont été placés dans une étuve à 48 °C et y sont restés pendant 5 jours, 3 jours avec une augmentation graduelle jusqu'à la température finale de 103 °C et 2 jours à cette température. Grâce à un dessiccateur contenant du gel de silice, les échantillons sont restés dans un environnement anhydre jusqu'au test dans le DMA. Il est important de signaler que les échantillons du traitement à 60 °C n'ont pas été mis à l'étuve, ils ont été placés directement dans le dessiccateur contenant du gel de silice.



Figure 22 – Préparation des échantillons de bois : détail du travail de la microtrouçonneuse

3.7.3. Conditions des essais au DMA

Neuf traitements thermiques ont été appliqués sur les échantillons des arbres (tableaux 4 et 5) :

Tableau 4 – Traitements thermiques des échantillons avec air (A)

Traitements	Temp. initiale °C	Temp. de traitement °C	Temp. finale °C
T1A	60	60	60
T2A	100	140	100
T3A	100	180	100
T4A	100	220	100

Tableau 5 – Traitements thermiques des échantillons avec azote (N)

Traitements	Temp. initiale °C	Temp. de traitement °C	Temp. finale °C
T1N	100	140	100
T2N	100	180	100
T3N	100	220	100
T4N	100	260	100
T5N	100	280	100

3.7.3.1. Essais préliminaires pour la programmation du Thermal Advantage (Programme de pilotage du DMA)

Des essais préliminaires ont été réalisés afin d'établir la programmation du logiciel et d'éclaircir quelques doutes comme : (i) le comportement du DMA (étanchéité de l'entrée d'air, le système de chauffage, la transmission d'informations avec l'ordinateur...) ; (ii) la durée d'essai (établir le temps minimal requis afin que les graphiques indiquent la stabilisation des propriétés de l'échantillon) et (iii) les éventuels problèmes avec les échantillons.

Grâce à ces essais, la procédure personnalisée de travail (test "Custom") a été définie, elle permet de choisir les informations initiales du logiciel. Ainsi, on a adopté : (i) module des fréquence multiples (0,1 Hz ; 1 Hz et 10 Hz) ; (ii) amplitude de l'arbre d'entraînement de 5 μm ; (iii) force initiale sur l'échantillon de 0,1 N et (iv) amplification de force de 150 %.

3.7.3.2. Programmation du logiciel en fonction du traitement

- Traitement T10 : 60 °C (tableau 6)

La température de 60 °C a été établie conformément au programme "Air et Bois" (LERMAB – ENGREF). Selon ce programme, les échantillons secs placés à une température de 60 °C et traités à l'air sec resteront anhydres.

Tableau 6 – Conditions du traitement à 60 °C

Étape	Traitement : 60°C	Temps total d'essai (min)
1	Isotherme	641
2	Alternance des trois fréquences	
3	Répéter les étapes 1 et 2 (250 fois)	
4	Refroidir à 50 °C	

- Les conditions des autres traitements (tableau 7)

Afin d'assurer l'état anhydre de l'échantillon, un palier à 100 °C pendant 30 min a été réalisé au début de chaque essai. Ensuite, la température est amenée à la valeur désirée à une vitesse de chauffe de 10 °C/min, afin d'éviter des transformations des échantillons lors de ce chauffage. Enfin, le choix de refroidir le four jusqu'à 90 °C a été fait afin de pouvoir comparer la valeur finale du module à sa valeur initiale (l'acquisition des données commence à 100 °C et finit à la même température, il existe un déphasage dans l'appareil de 10 °C, c'est la raison pour laquelle la température de 90 °C a été retenue). Les temps de traitement ont été de : 705 min (140 °C) ; 725 min (180 °C) ; 780 min (220 °C) ; 800 min (260 °C) et 860 min (280 °C) (annexe 3 – Les tableaux avec les traitements).

Tableau 7 – Autres traitements (140, 180, 220, 260 et 280 °C)

Étape	Traitement
1	Isotherme à 100 °C
2	Monter 10 °C/min jusqu'à la température d'essai
3	Isotherme afin de stabiliser la température
4	Isotherme
5	Alternance des trois fréquences
6	Répéter les étapes 4 et 5 (250 fois)
7	Isotherme
8	Alternance des fréquences
9	Refroidir de 10°C
10	Répéter les étapes 7, 8 et 9 jusqu'à 90 °C

3.7.3.3. Analyse des résultats des propriétés physico-mécaniques obtenues avec le DMA

Afin de pouvoir effectuer une comparaison entre les différentes températures sans l'effet de la densité, un module de stockage adimensionnel a été établi. La densité pourrait influencer les résultats car il existe des variations entre les arbres (annexe 4 – Variations des modules, avant le traitement, entre échantillons et entre espèces). En outre, le fait que les échantillons de l'essai à 60 °C ne soient pas restés dans le four du DMA à 100 °C pendant 30 min (afin d'éliminer toute trace d'humidité) rendait impossible la comparaison avec les autres essais (relations temps/valeur du module différentes). Aussi, pour créer les graphiques, le dernier point à 100 °C (c'est-à-dire, avant que la température commence à augmenter) a été retenu comme le t_0 . Ensuite, cette valeur de module de stockage a été divisée par elle-même afin de pouvoir effectuer des comparaisons ultérieures sur la base 1. Enfin, toutes les valeurs du module ont été divisées par cette même valeur de module initial. Ainsi, les valeurs ont été changées, sans toutefois modifier les comportements des courbes.

Entre les résultats des essais en DMA, les graphiques avec différents axes des ordonnées en fonction du temps ont été obtenus. Les axes étaient : (i) température (°C) ; (ii) module de stockage (MPa) ; (iii) module de perte (MPa) ; (iv) $\tan \delta$ (coefficient de perte). Le module de stockage a été utilisé pour les analyses des résultats.

Un arbre (parmi trois) de chaque essence a été retenu pour réaliser les analyses graphiques car ils ont présenté un comportement semblable. Ce choix a été placé dans les graphiques comparatifs (annexe 5). Les arbres choisis et leur densité respective ont été : (i) traitements avec air – *E. grandis* – arbre 1 (0,618 g/cm³) ; *E. saligna* – arbre 6 (0,606 g/cm³) et *C. citriodora* – arbre 8 (0,803 g/cm³) ; (ii) traitements avec azote - *E. grandis* – arbre 3 (0,595 g/cm³) ; *E. saligna* – arbre 4 (0,585 g/cm³) et *C. citriodora* – arbre 9 (0,777 g/cm³) ; (iii) comparaisons des essais (air x azote) - *E. grandis* – arbre 1 (0,618 g/cm³) ; *E. saligna* – arbre 6 (0,606 g/cm³) et *C. citriodora* – arbre 9 (0,777 g/cm³).

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1. Masse volumique basale

Le tableau 8 indique les densités par arbre et les densités par essence. Afin d'interpréter les résultats du DMA, les valeurs de masse volumique de chaque échantillon (annexe 10) ont été utilisées car on a obtenu une grande variation des valeurs initiales du module de stockage. D'autre part, on a utilisé les deux valeurs (masse volumique par arbre et par espèce) du tableau 8 pour les analyses anatomiques.

Barrichelo et Brito (1977) ont trouvé des valeurs de densité d'*E. saligna* (0,66 g/cm³) plus élevées que celles d'*E. grandis* (0,62 g/cm³), comme Ferreira (1979). Alzate (2004), dans son travail avec des clones d'Eucalyptus, a obtenu le même résultat, malgré des différences très petites (0,01 g/cm³). En revanche, Mori et al (2003) ont trouvé l'inverse.

La facilité du travail des bois d'*E. grandis* et d'*E. saligna*, en vertu de leur faible densités, permet l'utilisation en déroulage, sciage, meubles, cellulose et charbon. *E. grandis* a été la principale essence pour les industries du papier et de la cellulose (Ferreira, 1979).

Pour le bois de *C. citriodora*, Hellmeister et al (2005), Barrichelo et Brito (1977) et le Manuel du bois – IPT (2003) indiquent des valeurs plus élevées (plus de 0,7 g/cm³). Ainsi, il s'agit du bois le plus dense utilisé dans ce travail.

Tableau 8 – Masse volumique basale du bois de tous les arbres et valeurs moyennes par essence

Essence	Arbre	Densité basale (kg/m ³)	Ecart-type	Densité basale (kg/m ³) par espèce
<i>E. grandis</i>	1	618 (0,020)	0,055	576
	2	514 (0,016)		
	3	595 (0,018)		
<i>E. saligna</i>	4	585 (0,004)	0,036	616
	5	656 (0,013)		
	6	606 (0,009)		
<i>C. citriodora</i>	7	796 (0,001)	0,013	792
	8	803 (0,009)		
	9	777 (0,028)		

4.2. Analyses anatomiques et physiques du bois

4.2.1. Teneurs en duramen, aubier et écorce

Conformément au tableau 9, le tronc de l'espèce *E. grandis* (figure 23) a présenté, en pourcentage, la plus grande proportion de duramen et ses valeurs ont été plus importantes en fonction de l'augmentation de la hauteur. Aussi, cette essence a présenté la plus petite épaisseur d'écorce, avec une diminution en fonction de l'augmentation de la hauteur. Les plus grands disques et épaisseurs

d'écorce ont été obtenus sur le tronc d'*E. saligna* (tableau 9). Pour l'aubier, les valeurs sont restées très proches tout au long de la hauteur. Enfin, les plus petits disques sont issus du tronc de *C. citriodora* (tableau 9), ceci étant dû à sa densité élevée (par rapport aux essences étudiées). De plus, pour cette dernière, la proportion de duramen ne varie pas en fonction de la hauteur. Cette variation peut être visualisée pour l'aubier et l'écorce. Tandis que l'aubier a augmenté, l'écorce a diminué en fonction de la hauteur.

Alzate (2004) a trouvé pour les clones d'*E. grandis* une augmentation de la teneur en duramen dans le premier quart de la hauteur commerciale du tronc. Pour les valeurs d'aubier, elle a constaté une petite réduction entre la base et le DHP, suivi d'une augmentation jusqu'en haut du tronc. Ces résultats sont communément trouvés dans la bibliographie. À l'inverse du présent travail, elle a obtenu une diminution de la teneur en duramen entre la base et le haut du tronc d'*E. saligna*. Dans le même sens, la teneur en aubier a augmenté.

Oliveira et al (1999) ont obtenu pour les $\frac{3}{4}$ de la hauteur du tronc d'*E. grandis* une grande diminution des valeurs de pourcentage pour l'écorce. Pour l'essence *C. citriodora*, il a trouvé les valeurs de pourcentage qui diminuent jusqu'à la mi-hauteur, suivi par un accroissement jusqu'aux $\frac{3}{4}$ de la hauteur du tronc. Cette quantification de duramen et d'aubier est très importante pour connaître la meilleure utilisation du bois. En général, le bois de duramen est plus utilisé lorsque les exigences sont surtout durabilité et résistance mécanique, en fonction de sa résistance aux insectes et sa rigidité.

Comme le *C. citriodora* présente des teneurs en aubier élevées, son bois possède une grande perméabilité, c'est la raison pour laquelle il est nécessaire de le traiter. En revanche, il a un potentiel pour les applications qui exigent un effort mécanique (comme la construction) grâce à sa densité.

La figure 24 indique qu'entre les trois essences, *C. citriodora* présente la variation la plus faible de diamètre du disque en fonction de la hauteur de son tronc, il est plus homogène sur toute la longueur du tronc. Ceci rend possible un bon maniement et exploitation de ses grumes. D'autre part, cette espèce a présenté les diamètres des disques les plus petits (l'unique exception fut l'arbre 1 – *E. grandis*).

Il est possible de voir que, parfois, l'arbre le plus dense présente un diamètre plus grand qu'un arbre moins dense, principalement entre les espèces *E. grandis* et *E. saligna*. Ce fait peut probablement être expliqué par les différences de peuplements entre les trois parcelles et à l'intérieur des parcelles des trois essences. Rappelons que dans ces zones, il n'a pas été possible de définir un espacement, c'est-à-dire qu'il existait des arbres plus ou moins isolés et, par conséquent, ils recevaient plus ou moins de lumière.

Il est important de souligner que beaucoup d'auteurs ont étudié les variations de la densité en fonction de la hauteur du tronc, mais cela n'a pas été effectué dans ce travail. Les densités basales ont été calculées seulement dans les disques à 0,42 m de hauteur du sol.

Tableau 9 – Variations des valeurs et pourcentages du duramen, de l'aubier et de l'écorce à différentes hauteurs du tronc

Essence	Hauteur (m)	Surface de duramen (cm ²)	Surface d'aubier (cm ²)	Surface d'écorce (cm ²)	Duramen (%)	Aubier (%)	Écorce (%)
<i>E. grandis</i>	0,42	1722,09	468,76	312,30	68,89	19,02	12,09
	2,78	1287,15	335,76	153,93	71,71	19,33	8,96
	5,02	1104,52	243,92	96,05	76,36	17,15	6,49
<i>E. saligna</i>	0,42	1897,67	565,93	554,32	62,40	19,90	19,90
	2,78	1349,46	391,40	303,47	65,76	19,82	19,82
	5,02	1196,66	340,47	274,01	66,00	19,12	19,12
<i>C. citriodora</i>	0,42	1203,99	493,21	291,97	60,53	24,87	14,60
	2,78	842,69	385,61	188,14	59,66	27,10	13,24
	5,02	813,24	371,43	143,95	61,18	27,99	10,83

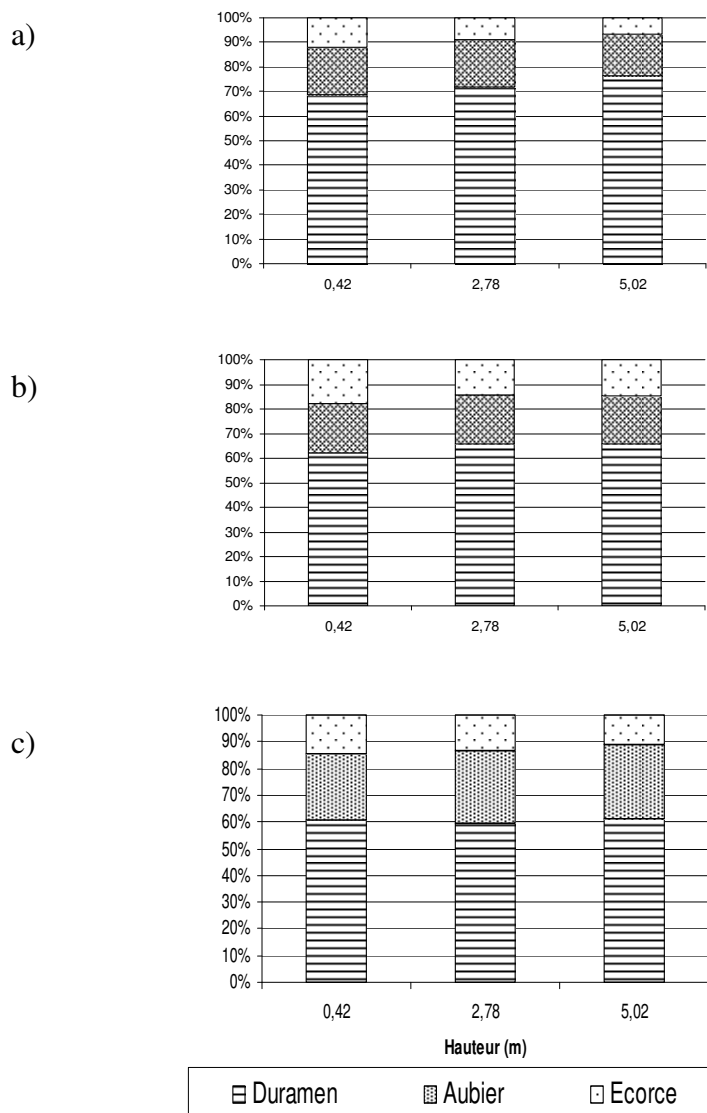


Figure 23 – Variations en pourcentages du duramen, aubier et écorce à différentes hauteurs du tronc (a – *E. grandis* ; b – *E. saligna* ; c – *C. citriodora*)

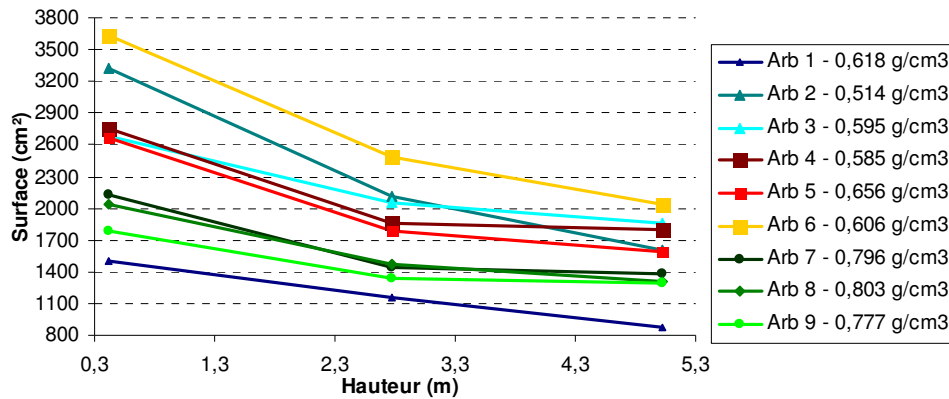


Figure 24 – Variations des surfaces des disques des troncs à différentes hauteurs du sol pour les trois essences d'Eucalyptus

4.2.2. Images en microscopie électronique à balayage environnementale (MEBE)

Dans les images microscopiques du bois d'*E. grandis* (Figure 25) il est possible de voir la petite épaisseur des parois de ses fibres, le grand diamètre du lumen et la porosité diffuse. Ces caractéristiques peuvent expliquer sa faible densité et sa croissance rapide (comparées avec le *C. citriodora*). Le parenchyme peut être classé comme paratrachéal (parenchyme longitudinal associé aux vaisseaux). Il est possible aussi d'observer les tyloses (processus au cours duquel les cellules du parenchyme émettent leur cytoplasme dans les vaisseaux, lors du vieillissement des plantes (Tomazello, 2005).

Selon Silva et al (2005), le bois d'*E. grandis* présente des diamètres moyens du lumen des vaisseaux de 100 à 200 μm , largeur des vaisseaux fins de 15 μm . La texture moyenne et le parenchyme peuvent ou non être visualisées avec l'œil nu. Les vaisseaux sont grands avec un diamètre tangentiel de 100 à 300 μm . Iowa (1989), cité par Silva (2005), la texture est liée aux dimensions, à la distribution et à l'abondance des éléments qui constituent le xylème secondaire. La texture peut être classée en fine, moyenne et épaisse. Dans la première, les pores possèdent un diamètre inférieur à 100 μm et le parenchyme est insuffisant ou invisible à l'œil nu ; dans la deuxième, le parenchyme peut ou non être visible avec l'œil nu et les pores sont déjà plus grands (entre 100 et 300 μm) ; dans le troisième, les rayons sont vraiment larges et le parenchyme abondant.

Mori et al (2003), en un travail sur les tonneaux, ont trouvé la présence de tyloses dans les bois d'*E. grandis* et d'*E. saligna*. L'auteur a montré que la petite quantité de vaisseaux ou pores et la présence de tyloses indiquent un bois moins perméable aux liquides.

De plus, les études qui ont été réalisées sur les essences d'*E. grandis* et d'*E. saligna* ont établi que la pénétration du liquide, la densité et la qualité des papiers d'impression sont liées à la taille et au nombre des vaisseaux dans le bois (Stockan, 1970; Hillis et Brown, 1978, cités par Tomazello, 1985b). La connaissance des caractéristiques des fibres présentes dans le bois permettent sa bonne utilisation

dans l'industrie du papier. Par exemple, afin de fabriquer des papiers pour l'impression, il est important de connaître l'épaisseur de la paroi cellulaire. Si elle est grande, les papiers présenteront des volumes spécifiques plus élevés. Cette épaisseur peut aussi contribuer favorablement à la douceur et à l'opacité des papiers. Les fibres plus courtes contribuent à une bonne formation de la feuille et les plus longues favorisent la résistance à la déchirure (Gomide, 2005).

Comme les bois d'*E. grandis* et d'*E. saligna* présentent des valeurs très proches de masse volumique, dans ces images (figure 25 et 26) il est possible de voir une grande similitude (la porosité diffuse, les parois des fibres fines, la présence de tyloses et le lumen avec un grand diamètre). Tomazello (1985a) a conclu que les caractéristiques différents entre ces 2 essences sont : sur le plan transversal, pour *E. saligna*, les vaisseaux, avec une tendance à constituer des alignements obliques, présentent un diamètre tangentiel plus important, tandis que des vaisseaux plus isolés, de distribution homogène, présentent un diamètre plus petit. Par contre, *E. grandis* possède des vaisseaux distribués de façon plus homogène. De plus, les rayons sont plus étroits et présentent une quantité de cellules moins importante que chez *E. saligna*.

D'autre part, dans les images du bois de *C. citriodora* (figure 27), il est possible de voir la grande épaisseur de la paroi cellulaire de ses fibres ainsi que le petit diamètre du lumen. Il présente aussi une porosité diffuse et des tyloses en grande quantité. Son parenchyme peut être classé comme paratrachéal aliforme.

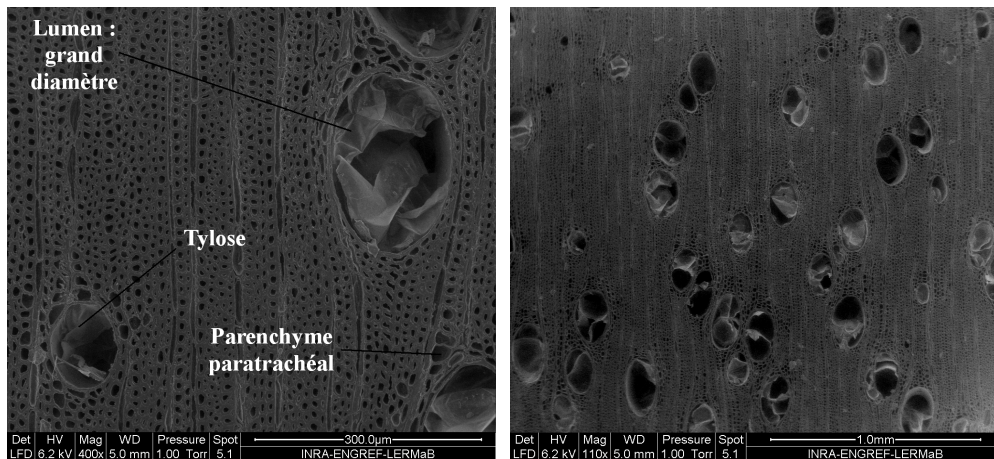


Figure 25 – Images microscopiques d'une coupe d'*Eucalyptus grandis* (réalisées par Almeida, 2007)

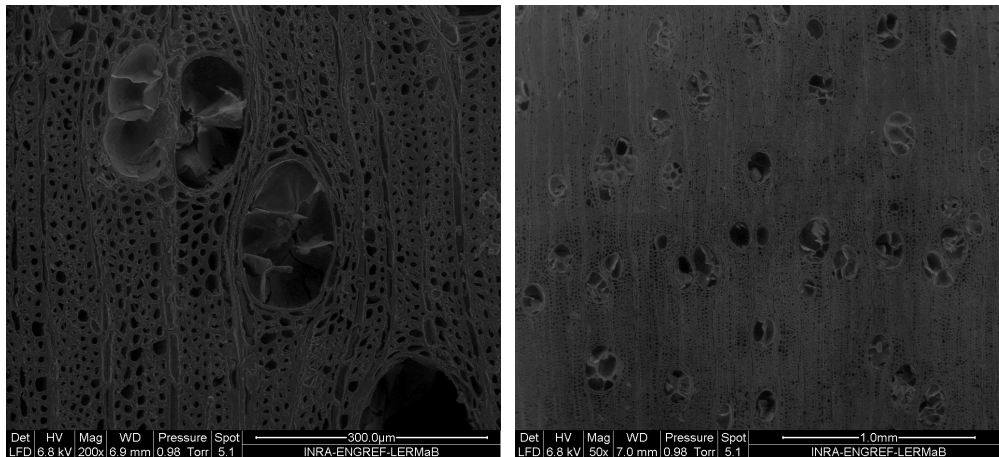


Figure 26 – Images microscopiques d'une coupe d'*Eucalyptus saligna* (réalisées par Almeida, 2007)



Figure 27 – Images microscopiques d'une coupe de *Corymbia citriodora* (réalisées par Almeida, 2007)

4.2.3. Variations dimensionnelles (sens : moelle – écorce)

4.2.3.1. Domaine hygroscopique (du PSF jusqu'à l'état anhydre)

Le retrait du bois est un aspect très important afin d'évaluer son potentiel pour l'industrie. Selon Lima (1996), les retraits volumiques, tangentiel et radial de l'Eucalyptus présentent une relation statistiquement significative avec la densité basale. En général, les plus grandes valeurs de retrait sont observées à la base des arbres. Ces variations peuvent limiter quelques utilisations du bois et aussi nécessiter des techniques spécifiques pour le traitement et l'utilisation du bois (Moura, 2000 ; Durlo et Machiori, 1992).

La figure 28 montrent l'absence de relation entre le retrait (de l'état vert jusqu'à l'état anhydre) et la distance de la moelle ainsi que la relation entre la valeur de densité et le valeur de retrait n'a pas été possible de voir (normalement si la densité est plus élevée, le retrait est plus fort). Les

valeurs à l'intérieur des essences et entre essences ont été très différentes, même entre *E.grandis* et *E.saligna* qui présentent des densités basales proches.

En analysant l'évolution radiale de la densité anhydre, on observe une augmentation dans le sens moelle-écorce pour les trois essences jusqu'à la fin du duramen, ensuite il y a une stabilisation et enfin une diminution jusqu'à la fin de l'aubier. Selon Tomazello (1987), l'étape où les valeurs augmentent peut être utilisée pour caractériser le bois juvénile (tant qu'il est formé, les valeurs de densité ne sont pas stables). Dans un autre travail, Tomazello (1985b) a montré une augmentation de la valeur de la densité basale dans le sens moelle-écorce et a encore indiqué que ces résultats se trouvent fréquemment dans les bibliographies pour *E.grandis* et pour *E.saligna* quelque soit l'âge de l'arbre et la région. D'autre part, il a observé une diminution de la quantité des vaisseaux (facteur lié à la densité) dans ce même sens. Les valeurs des densités basales de ces dernières espèces sont bonnes pour l'industrie du papier et de la cellulose (Ferreira, 1970, 1972; Barrichelo et al, 1983b; Foelkel et al, 1983, cités par Tomazello, 1985b).

Le calcul montre que le retrait tangentiel est approximativement deux fois plus élevé que le retrait radial (annexe 6 – Valeurs de la relation T/R, densités anhydres et retraits radial, tangentiel et volumique). Oliveira et Silva (2003) donnent cette proportion et disent que la relation T/R, connue comme facteur d'anisotropie, varie de 1,5 à 2,5. Si ce facteur présente des valeurs importantes, le bois présentera une tendance plus grande au gauchissement et au fendillement. Panshin et De Zeeuw (1980) ainsi que Moreira (1999), cités par Silva et al. (2006) ont dit que les plus grands retraits sont observés dans le sens tangentiel aux cernes, ensuite dans le sens radial et enfin dans le sens longitudinal (presque négligeable). En plus, les retraits sont associés : (i) à l'interaction de la quantité de la substance bois avec la moyenne de l'angle des microfibrilles dans les parois des cellules, en relation avec l'axe longitudinal de la cellule et (ii) à l'extension de la lignification de la paroi de la cellule.

Cruz et al. (2003) a trouvé, pour le bois de clones d'Eucalyptus, des valeurs moyennes de 4,9 % pour les retraits radiaux, 8,9 % pour les tangentiels et 13,46 % pour les volumiques (valeurs semblables à ce travail). En plus, l'auteur dit que les retraits les plus variables sont dans le sens moelle-écorce et, ensuite, de la base vers le houppier des arbres.

Tomazello (1985b) a conclu que les arbres plus âgés présentent un bois de meilleure qualité, car il est possible d'isoler le bois de moindre qualité (proche de la moelle).

À la différence de ce travail, Oliveira et Silva (2003) ont trouvé, pour *E. saligna*, des retraits volumique, tangentiel et radial plus petits dans la région de la moelle. Ils l'expliquent par les grands angles des microfibrilles qui existent dans cette région (par l'augmentation de la longueur de la cellule et par la teneur en cellulose). Les valeurs de ces coefficients sont croissantes jusqu'à l'extrémité (écorce). Les mêmes auteurs encore rapportent qu'Oliveira (1977) a observé une augmentation du retrait dans le sens moelle-écorce pour de nombreuses espèces d'Eucalyptus. Moreira (1999), cité par Silva et al. (2006), interprète ceci comme un réflexe de l'accroissement à la masse spécifique (sens moelle-écorce). Probablement, la variabilité qui a été trouvée est due à des changements que le

cambium a endurés pendant son vieillissement et par les changements des conditions environnementales.

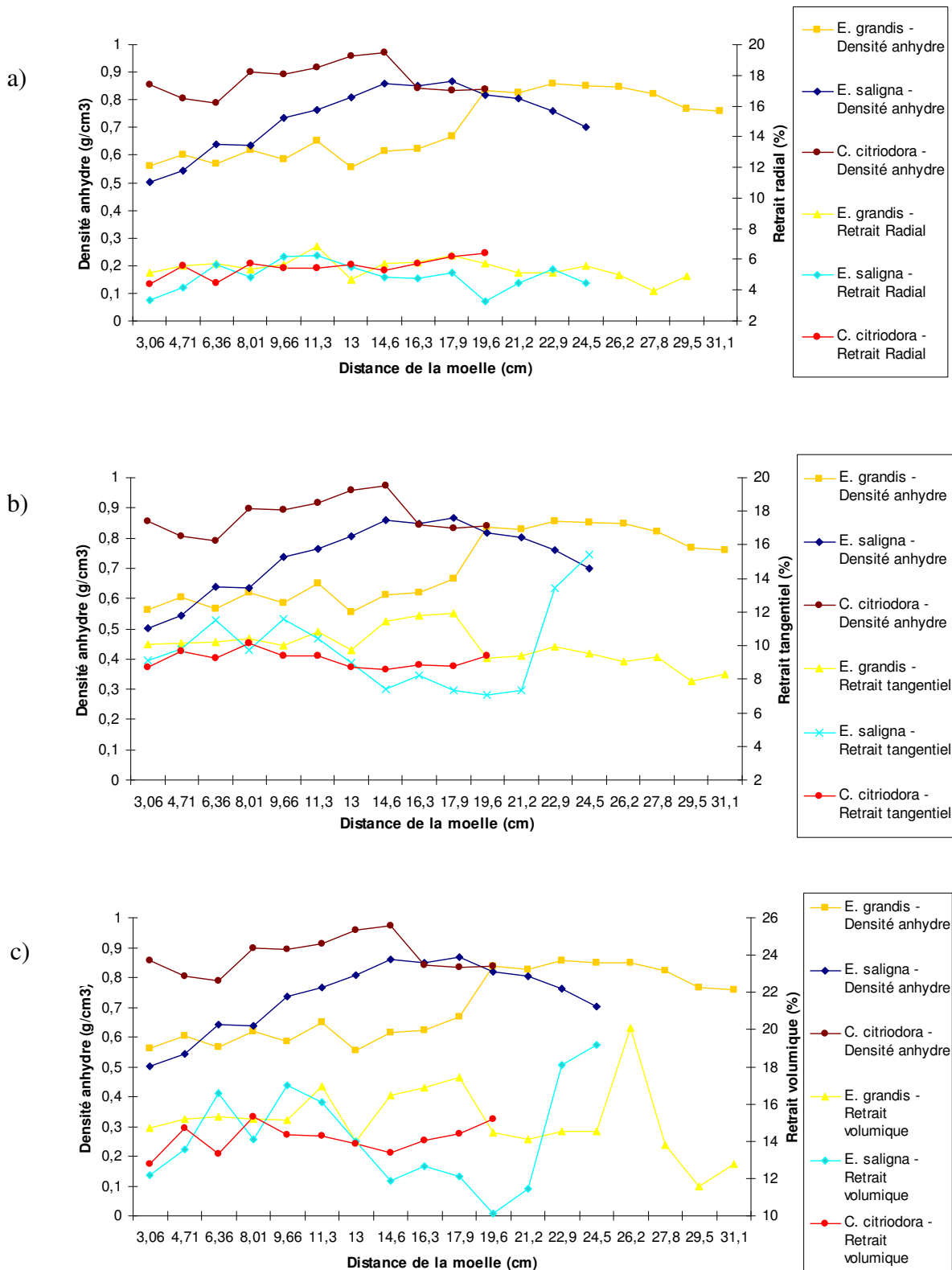


Figure 28 – Retrait (a – radial ; b – tangential ; c – volumique) des échantillons du bois d'Eucalyptus de l'état vert à l'état anhydre

4.2.3.2. De l'état anhydre jusqu'à la fin du traitement thermique à 220 °C

Sur la figure 29, l'espèce *C. Citriodora* présente une relation entre la perte de masse et la densité, facilement visible dans l'intervalle de 14,61 cm à 16,26 cm. La courbe de perte de masse à cause de la dégradation du bois pendant le traitement thermique, a suivi la tendance de la courbe de la densité anhydre. De plus, cette espèce présente les plus grands retraits (tangentiels et radiaux) dus à sa densité plus forte. D'autre part, cette relation ne peut pas être observée pour les autres essences. Alors qu'*E. saligna* présente une perte de masse constante sur tout le rayon (même si la densité varie), sur la courbe d'*E. grandis*, une diminution des valeurs est observée.

Dans les variations radiale, tangentielle et volumique des trois essences (figure 30) il n'a pas été possible de constater de relation avec la densité anhydre. Les courbes d'*E. grandis* et d'*E. saligna* ont présenté un comportement presque constant sur tout le rayon. La courbe de *C. citriodora* a présenté une petite similitude pour le retrait radial et n'a rien montré pour les courbes de retrait tangentiels et volumiques.

Les valeurs supérieures à 1 ont été obtenues par la relation T/R d'*E. grandis* et d'*E. saligna*. D'autre part, la relation T/R de *C. citriodora* a révélé des valeurs différentes, car ces types de valeurs ont été trouvés pour le retrait tangentiels (annexe 7 – Tableau avec les valeurs des retraits tangentiels, radiaux et relations T/R).

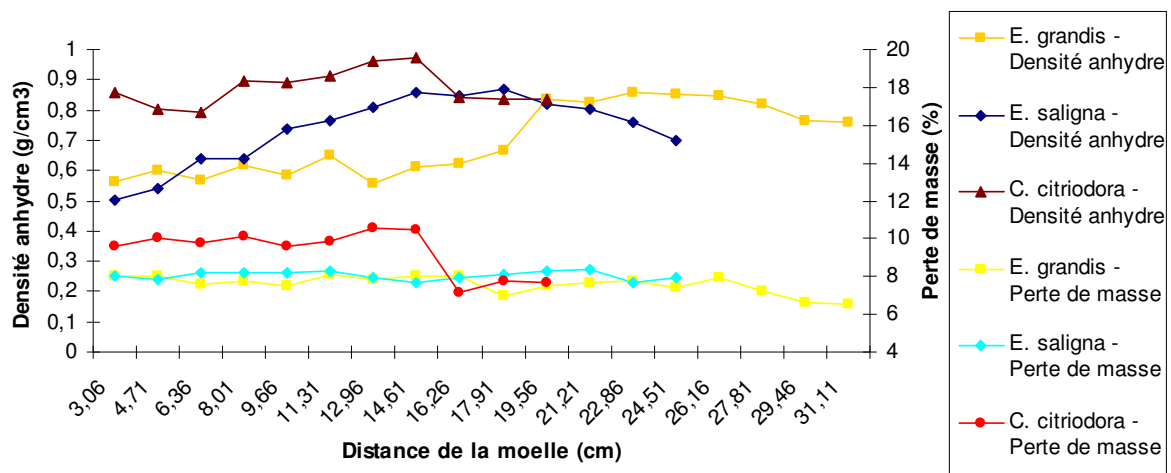


Figure 29 – Perte de masse des échantillons du bois d'Eucalyptus après traitement thermique à 220 °C

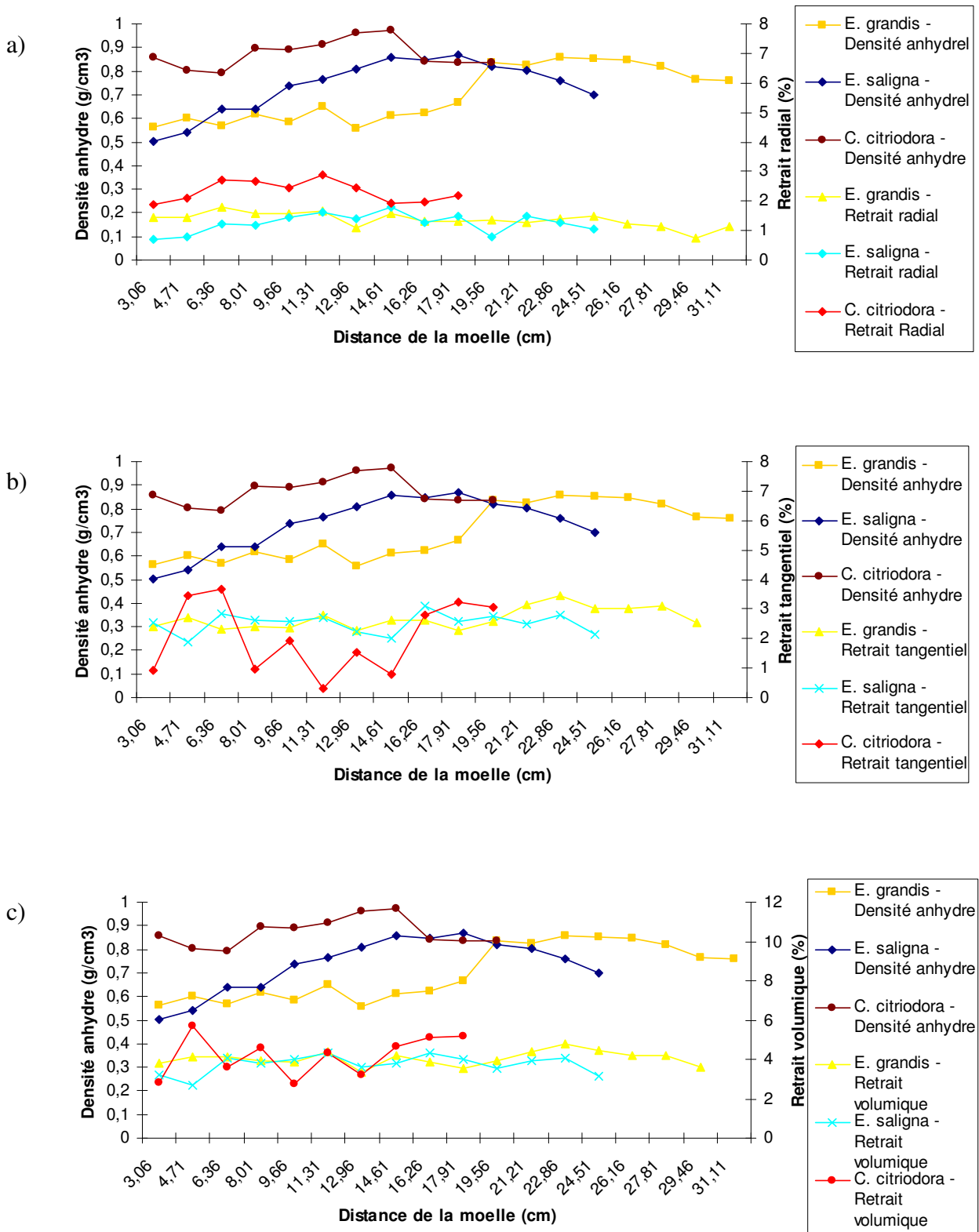


Figure 30 – Retrait (a – radial ; b – tangential ; c – volumique) volumique des échantillons du bois d'Eucalyptus après traitement thermique à 220 °C

4.3. Effets du traitement thermique avec le DMA

4.3.1. Coloration des échantillons

Les couleurs des trois essences de bois ont été modifiées (figure 31) après le traitement thermique à l'aide du DMA. Il y a eu une relation entre la coloration et la température, avec une tendance à la stabilisation du noircissement aux températures les plus élevées. Par exemple, la variation de la coloration dans l'intervalle de 100 à 140 °C est plus évidente qu'entre 180 à 220 °C. Cette variation est plus faible pour le bois de *C. citriodora*, le plus foncée, si la même comparaison est réalisée dans ces mêmes intervalles. En outre, avec l'œil nu, il est difficile de distinguer une différence de couleur entre les échantillons soumis aux traitements à même température avec l'air et avec l'azote.

Borges et Quirino (2004 et 2007) ont trouvé les mêmes résultats et citent Kotilaine (2000), Hakkou et al. (2003), Hoffmeyer et al. (2003), Reppelin et Guyonnet (2003) qui ont obtenu le noircissement des bois d'Eucalyptus soumis à la température. Selon Tjeerdsma et al. (1998), cités par Borges et Quirino (2007), ce changement est attribué aux produits de l'oxydation pendant le traitement, comme les quinones. En revanche, la figure 31 montre que les échantillons soumis au traitement avec azote (sans la présence d'oxygène) ont également eu leurs couleurs modifiées. Ceci peut alors être dû à l'oxygène présent à l'intérieur du bois. Il sera intéressant de réaliser des essais de calorimétrie.

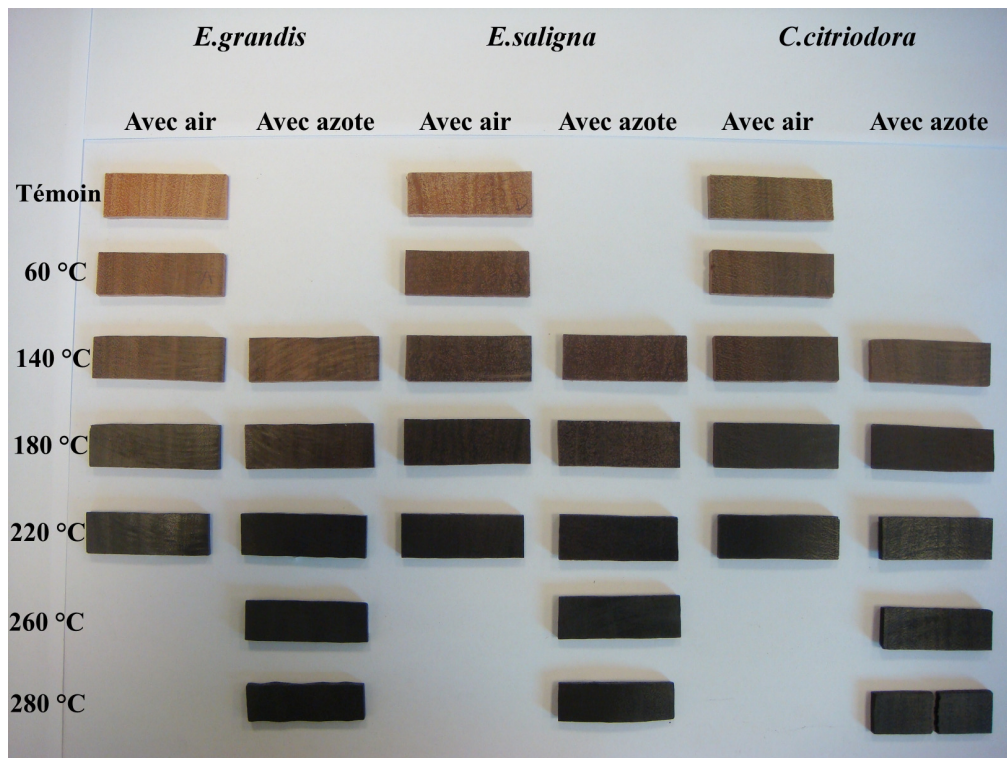


Figure 31 – Différence de couleur entre les échantillons d'Eucalyptus soumis à traitement thermique

4.3.2. Perte de masse et retrait tangentiel après traitement thermique au DMA

La perte de masse en fonction de la température a été observée pour les trois espèces. Il a également été possible d'établir une relation entre la température et la perte de masse qui est indiquée par un R^2 proche de 1 sur les figures 32, 33 et 34. Ces courbes montrent une relation exponentielle entre ces deux facteurs. Même pour les courbes du traitement avec l'air qui a été effectué jusqu'à la température de 220 °C (les courbes ont seulement trois points), le R^2 a été proche de 1 et les 2 traitements ont présenté des valeurs proches. Le *C. citriodora* n'a pas donné de résultats pour les essais à 280 °C car tous ses échantillons ont été cassés lors de l'augmentation de la température (voir figure 51).

En revanche, une différence basée sur l'écart-type entre les traitements avec air et azote a été observée pour les essais avec *C. citriodora* (140 et 180 °C) et *E. grandis* (140 et 220 °C) (annexe 8). Au début, le traitement avec azote présente une tendance à la dégradation plus grande pour le bois, mais à partir d'une certaine température, la dégradation avec l'air devient plus grande qu'avec l'azote (seul *C. citriodora* a eu un comportement différent).

Entre les trois espèces, un comportement typique dans tous les essais a été observé (annexe 8). *E. saligna* a présenté la plus grande perte de masse. Ceci est peut-être dû à sa faible densité, car ses échantillons sont les plus légers et donc il y a plus d'espace pour la circulation d'air à l'intérieur. Au contraire, *C. citriodora* a présenté la plus faible perte de masse (et inversement aussi, il présente la densité la plus élevée). La différence entre les espèces est encore plus marquée aux hautes températures. À 140 °C, en se basant sur l'écart-type, on n'observe pas de différence entre les espèces, avec ou sans air.

Le retrait tangentiel, pour les trois espèces, a eu un comportement semblable à la perte de masse, avec un R^2 aussi proche de 1, en utilisant une fonction exponentielle. Le même retrait entre les essais avec et sans azote a été observé, à l'exception d'*E. saligna* à la température de 180 °C, où le retrait lors du traitement avec azote a été plus grand. Cette dernière espèce a présenté le plus grand retrait et *C. citriodora* le plus petit, lorsque la différence a été significative (basée sur l'écart-type des graphiques) (annexe 8).

Brito et al. (2006) a constaté pour le bois d'*E. grandis* une augmentation de la perte de masse en fonction de l'augmentation de la température, avec des différences significatives entre les traitements. Il a dit aussi que les étapes de la pyrolyse peuvent être identifiées par la perte de masse, à cause des réactions chimiques vérifiées en relation avec l'augmentation de la température.

Rousset (2004) a observé que la durée du traitement est un paramètre important et que les réactions chimiques continuent sur de très longues durées. Il a dit également qu'après une phase de séchage endothermique (80-120 °C), le bois est sujet à une dégradation thermique exothermique à partir de 200 °C qui s'accompagne d'une perte de masse importante après 240 °C. De manière générale, la pyrolyse du bois sera fréquemment décrite par un modèle de réactions parallèles et

indépendants décrivant la décomposition individuelle des constituants majeurs : cellulose, hémicellulose et lignine. À basse température (190 – 220 °C) on a une perte de masse correspondant à la décomposition des hémicelluloses et dans une moindre mesure à celle des lignines et une autre à plus haute température (240 – 270 °C) attribuée à la décomposition des hémicelluloses, de la cellulose et de la lignine.

Il est important de dire que les mesures de perte de masse et retrait ont été effectuées par différentes personnes. Ceci peut engendrer quelques petites différences dans les résultats. Aussi, les mesures dans le sens longitudinal et radial n'ont pas été traitées, la première a été négligée et la deuxième inexploitable due à la courbure des échantillons après le traitement.

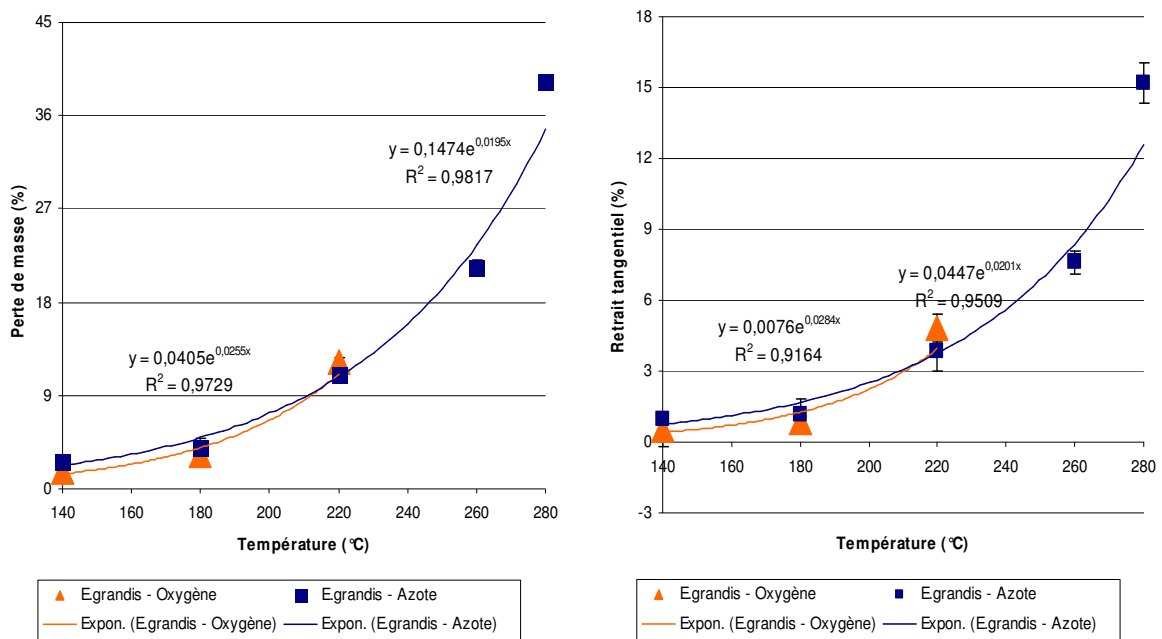


Figure 32 – *E. grandis* : Perte de masse et retrait tangentiel en fonction de la température

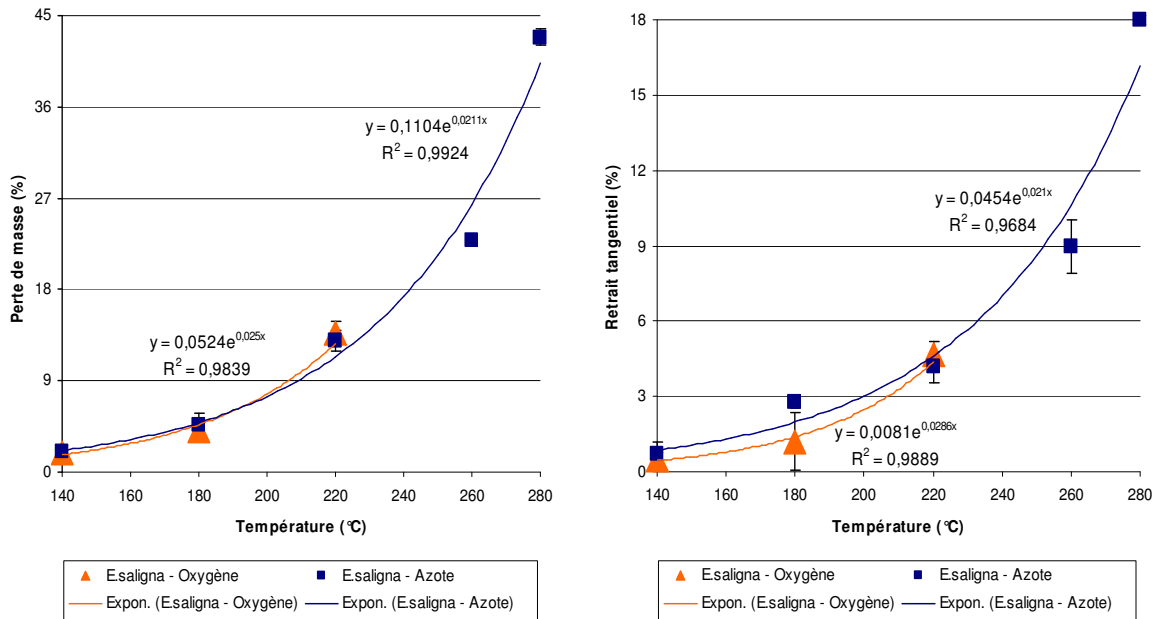


Figure 33 – *E. saligna*: Perte de masse et retrait tangentiel en fonction de la température

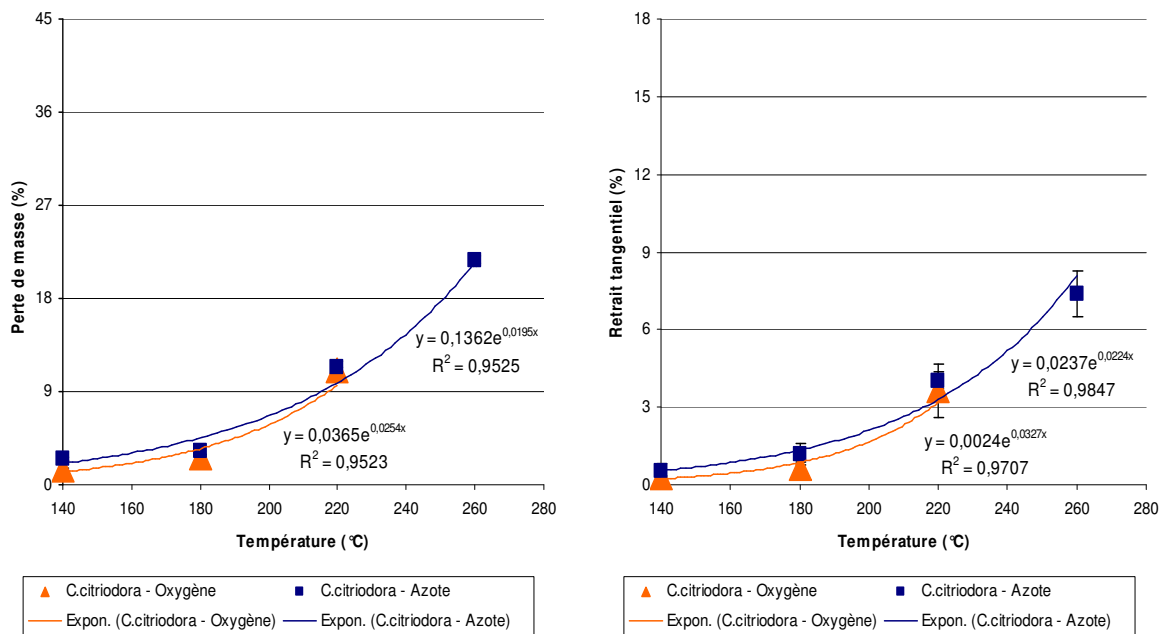


Figure 34 – *C. citriodora* : Perte de masse et retrait tangentiel en fonction de la température

4.4. Analyse des résultats des propriétés physico-mécaniques obtenues avec le DMA

De récentes études par l'analyseur mécanique dynamique (DMA) ont confirmé l'importance du couplage du temps de traitement et de la température de traitement sur les propriétés physiques du bois traité (stabilisation dimensionnelle, perte de résistance et perte de résilience), résultats en accord

avec la littérature (Bonhke, 1993 ; Dirol et Guyonnet, 1993 ; Tjeerdsma, Boonstra et al., 1998 ; Kotilainen et al., 1999 ; Labat et al., 2000 ; Santos Antonio 2000 ; Zaman et al., 2000) (Rosset, 2004).

4.4.1. Effet de la température dans la même essence

4.4.1.1. Traitement avec air

La similitude entre les trois graphiques (figure 35) est le comportement des courbes du module de stockage [semblable au module d'Young] pendant le traitement et en fonction de la température. Dans un premier temps, lorsque la température commence à monter, les échantillons répondent avec une activation thermique (indépendamment de la température), qui est représentée par une diminution des valeurs du module. Dans un deuxième temps, ces courbes s'accroissent (modifications moléculaires) jusqu'à une stabilisation (deviennent presque parallèles à l'axe des abscisses). Cette partie peut être expliquée, selon Rousset (2004) par la réticulation moléculaire de la lignine durant la dégradation, qui est plus forte dans les échantillons de *C. citriodora*. À la fin de l'essai, les échantillons ont atteint un état moins visqueux et plus élastique, représenté par un coefficient de perte avec des valeurs plus faibles à la fin du période de température constante. Ainsi, une relation entre les propriétés physico-mécaniques et la température du traitement a été constatée pour les trois essences, avec la variation des propriétés la plus élevée pour les températures les plus hautes.

Sur la figure 35 – a, une forte dégradation du bois d'*E. grandis* à la température de 220 °C a été observée. Le module de stockage (adimensionnel) commence à 1 et finit à 0,8 approximativement, l'échantillon est moins rigide à la fin du traitement. En revanche, les autres courbes ont révélé des valeurs du module supérieures aux valeurs initiales et toutes les valeurs du coefficient de perte ont été plus faibles à la fin du traitement (annexe 9). Ceci indique que les échantillons ont eu leurs propriétés viscoélastiques modifiées, ils sont plus rigides (car les molécules qui étaient mobiles ont été cassées quand les échantillons ont été soumis à la haute température et nouvelles molécules plus rigides ont été recrées) et plus cassant après le refroidissement. Les courbes de 140 et 180 °C présentent un comportement différent (la courbe de 180 °C présente des valeurs plus élevées que celle à 140 °C). Au début, le module de la courbe de 180 °C présente une chute plus marquée, suivi d'une récupération plus forte que celle à 140 °C.

Pour le bois d'*E. saligna*, l'ordre des courbes : 220, 180, 140 et 60 °C en séquence a été trouvé, du plus faible module au plus élevé. De plus, tous les rapports des modules ont atteint des valeurs supérieures à 1, en fin de traitement. Jusqu'à 220 °C avec air, si la température est plus élevée, l'échantillon sera plus rigide et plus élastique, ceci étant dû à des dégradations et pertes de masse plus fortes (voir annexe 7, la différence entre les valeurs initiales et finales des coefficients de perte est plus grande pour les températures plus élevés). Il est important de souligner que la rigidité est différente de

la résistance, par exemple, l'acier est très rigide et résistant par rapport au verre, ce dernier étant très rigide mais présente une résistance faible.

Pour le bois de *C. citriodora*, les modules, principalement pour les températures de 180 et 220 °C, ont présenté la plus grande variation de valeurs. Ceci peut-être à cause de la teneur en lignine, Brito et Barrichello (1977) et Raad (2006) ont trouvé un pourcentage de lignine plus faible pour cette essence. Une teneur de lignine plus faible dans une essence qui présente les parois cellulaires plus épaisses, permet un glissement des cellules les unes par rapport aux autres, en effet à la température (variation du module).

La composition en lignine est très influencée par l'âge de l'arbre, par sa localisation dans l'arbre et par sa situation dans la paroi. La lignine est associée aux polysaccharides des parois cellulaires par des liaisons faibles (liaisons hydrogènes et de Van der Waals) et par des liaisons covalentes. Ces liaisons se feraient entre les lignines et les hémicelluloses. Ainsi, la lignine représente la "colle" du bois (Placet, 2006).

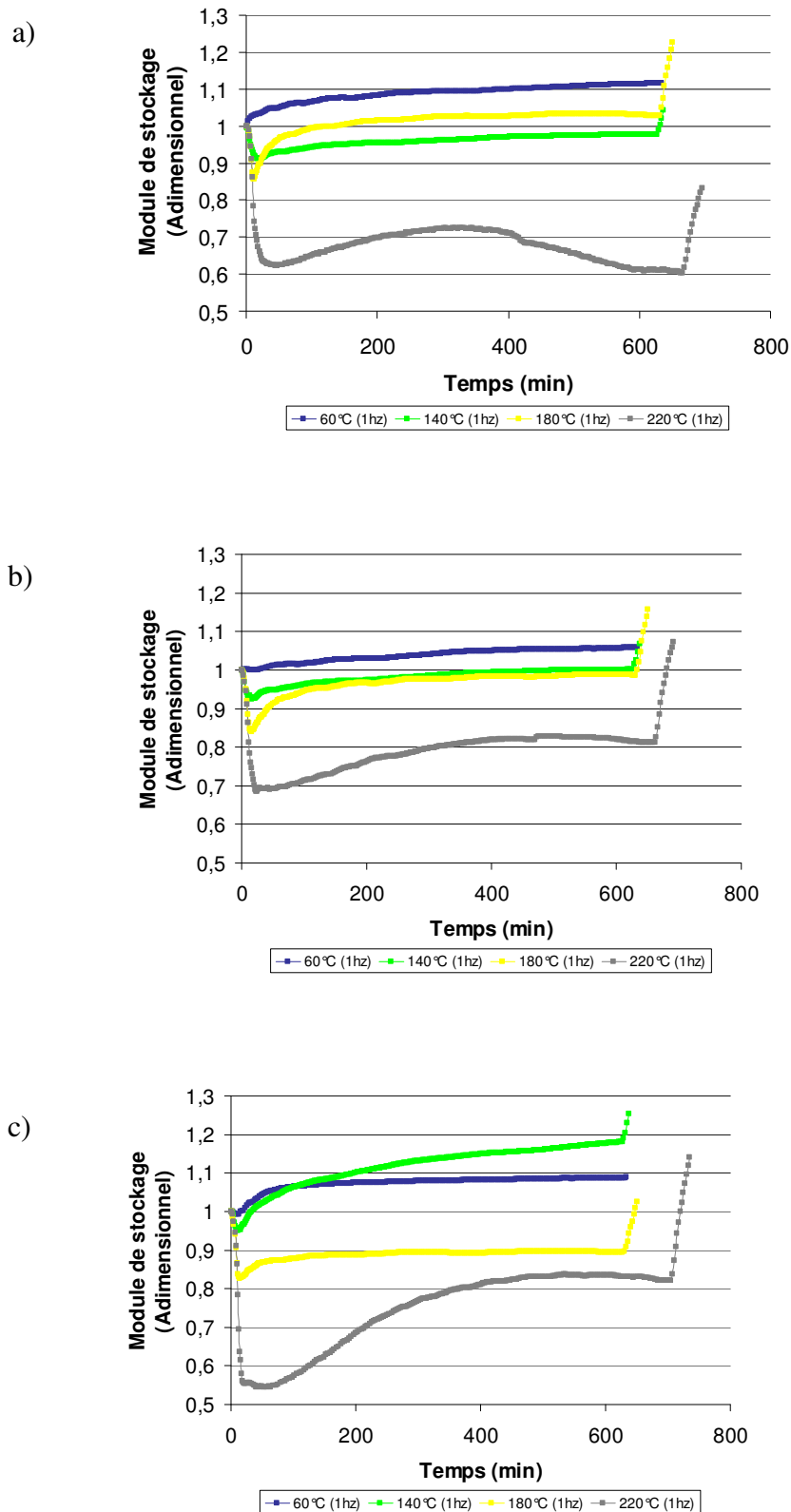


Figure 35 - Comparaison du module de stockage (adimensionnel) des échantillons

(a – *E. grandis* ; b – *E. saligna* ; c - *C. citriodora*) à différentes températures

4.4.1.2. Traitement avec azote

Comme pour l'essai avec air, le comportement des courbes est semblable : au début les courbes répondent à l'activation thermique par une diminution des valeurs, représentée par le ramollissement des échantillons, puis elles augmentent suite à la réticulation de la lignine, qui s'ajuste à la température. Les courbes de 260 et 280 °C montrent déjà le grand impact de la température, mais il n'existe pas une grande différence de la réponse à l'activation thermique entre elles. En revanche, la réticulation de la lignine lors du traitement à 280 °C est différente, avec une récupération faible des valeurs. On constate une diminution des valeurs vers 300 minutes pour l'essai d'*E.grandis* (Figure 36 - a) et vers 100 minutes pour *E.saligna* (Figure 36 - b). Ceci peut être attribué à la grande dégradation des molécules de hémicellulose de l'échantillon (Brito, 2006) qui présente des liaisons avec la lignine (Placet, 2006) et la décomposition de cellulose (Rousset, 2004). Les échantillons de *C.citriodora*, à 280 °C, ont été cassés à environs 2 minutes après que l'on ait atteint la température maximale. Quand la température est élevée, une faible teneur en lignine est plus sensible aux effets de l'augmentation de la température. C'est la raison pour laquelle l'échantillon devient le plus cassant.

À 140 et 180 °C, il n'est pas possible de voir une grande différence entre les courbes, pour toutes les espèces. Même le *C.citriodora* (Figure 36 - c) qui possède la plus grande variation entre 140 et 180 °C, cela n'est pas comparable à la différence entre les courbes à 180 et 220 °C (pour un même intervalle de température). A 220 °C, parfois, la récupération des courbes n'est pas complète, ceci peut être expliqué par la troisième étape de la pyrolyse, aux températures de 250 à 330 °C, qui est caractérisée par la destruction de l'hémicellulose (la substance du bois la plus sensible à la chaleur), selon Brito et al (2006). Rousset (2004) a dit que entre les températures de 260 et 290 °C il est possible d'observer surtout la décomposition de la cellulose et que le temps de vie des hémicelluloses ne serait que de 15 minutes à 260 °C. Les deux faits peuvent être observés en étudiant la perte de masse à 280 °C pour les deux essences (plus ou moins de 40 %) : elle est supérieure à la teneur en hémicelluloses (Raad (2006) a trouvé une teneur en hémicellulose de 26,5 % pour *E.grandis*), il y a alors eu décomposition de cellulose.

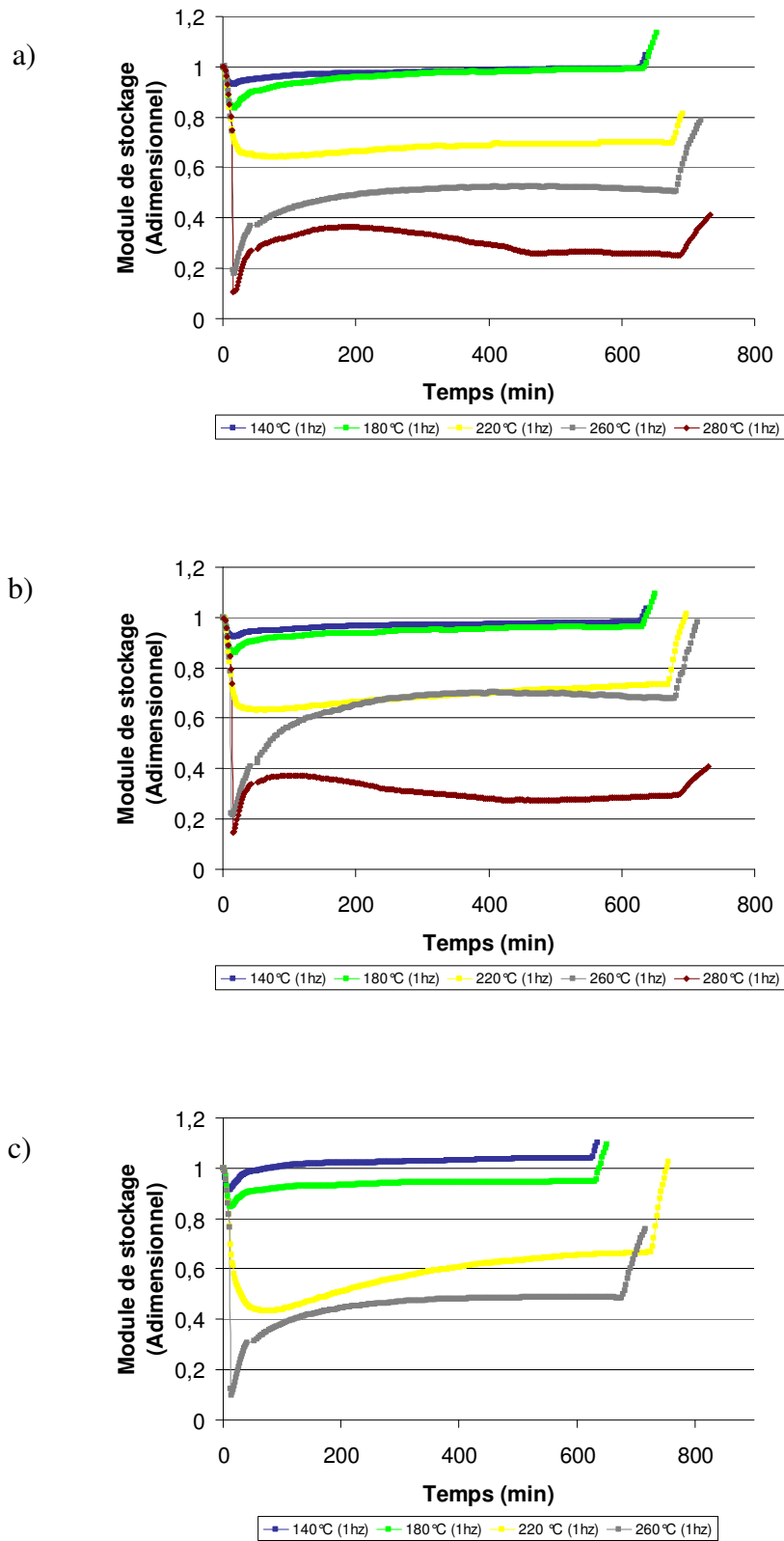


Figure 36 - Comparaison du module de stockage (adimensionnel) des échantillons (a – *E. grandis* ; b – *E. saligna* ; c - *C. citriodora*) à différentes températures

4.4.2. Variations entre essences soumises à même température

4.4.2.1. Traitement avec air

Toutes les courbes présentent un comportement semblable. D'abord, une petite augmentation des valeurs est notable. Elle indique le point où le DMA assure le séchage complet des échantillons, à 100 °C, pendant 30 minutes (le traitement à 60 °C ne présente pas cette étape). Ensuite, les valeurs commencent à descendre en réponse à l'augmentation de la température jusqu'au point désiré. Puis, c'est la récupération des valeurs en fonction de la réticulation moléculaire de la lignine. A la fin du test, les valeurs remontent lorsque la température redescend à 90 °C.

La différence entre les valeurs initiales des courbes de la Figure 37 est causée par les différences de densités entre les essences et les fréquences (Annexe 10 – voir tableau). Les échantillons de *C.citriodora* présentent les valeurs les plus élevées du module de stockage, suivies par les modules d'*E.saligna* et d'*E.grandis*. Parfois, cette observation n'est pas valide car il y a beaucoup de variations entre les modules initiaux (Annexe 4) qui ne présentent pas une relation significative aux valeurs de densité de chaque échantillon (Annexe 10 – voir graphique).

Sur les courbes du graphique à 60 °C, les valeurs initiales des modules sont inférieures à celles obtenues en fin de traitement. Ceci indique que même avec des faibles températures, où la dégradation du bois est négligeable, des variations peuvent être observées. Ce fait peut être interprété par des modifications moléculaires et par la perte de teneur en eau des échantillons pendant le traitement, sachant que il y avait une faible teneur en eau résiduelle des échantillons traités avec le gel de silice (Annexe 11). Selon Skaar (1972) et Placet (2006), la teneur en eau a beaucoup d'influence sur les propriétés mécaniques du bois.

Pour les traitements à 140, 180 et 220 °C, le début de la collecte des données a commencé à partir de la température de 100 °C (temps 0 min). Ces modules présentent des valeurs normalement inférieures aux modules du traitement à 60 °C (bois plus élastique dû à l'effet de la température).

Le graphique du traitement à 180 °C présente des disparités de valeurs du module, l'essence la plus dense a une courbe isolée (modules les plus élevés), tandis que les deux autres ont des valeurs proches. En outre, pour les trois arbres les valeurs du module final ont été plus élevées que les initiales et les coefficients de perte plus faibles à la fin du traitement.

Lors du traitement à 220 °C, il y a une grande dégradation du bois. Toutes les essences ont eu leurs échantillons fortement ramollis durant la rampe de montée en température. Ensuite, une réticulation de la lignine est observée (moment où les courbes commencent à monter). Enfin, les échantillons redeviennent plus rigides lorsque la température redescend.

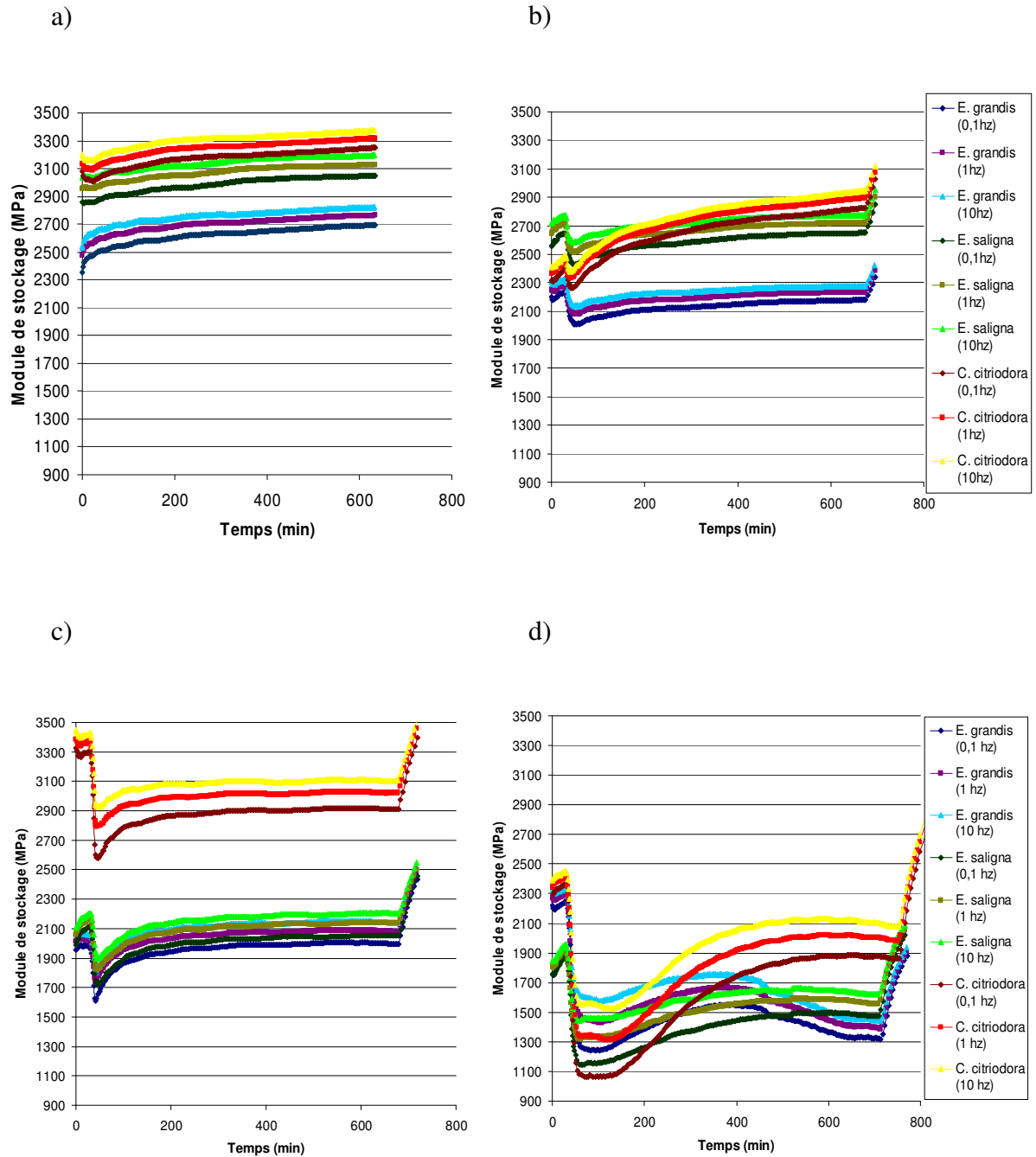


Figure 37 – Comparaison entre les trois espèces d'Eucalyptus soumises à : a – 60 °C ; b – 140 °C ; c – 180 °C ; d – 220 °C lors de l'essai au DMA

4.4.2.2. Traitement avec azote

La figure 38 montre les différentes valeurs des modules entre les essences. Il est possible de voir qu'à l'exception du traitement à 140 °C, *C.citriodora* présente les modules les plus élevés. Les graphiques des traitements avec azote présentent une différence plus grande entre les espèces que les traitements avec air.

Les effets de la température commencent à être plus ressentis à 220 °C, ainsi comme lors du traitement avec air. Ces effets sont indiqués par une chute brutale des valeurs du module lors de la montée en température. La figure 38 montre de manière évidente que le *C.citriodora* présente la plus grande variation. En revanche, cette espèce présente une récupération plus rapide du module pendant le traitement et après que la température commence à baisser, elle atteint les modules plus élevées que initialement, seulement à 260 °C, où il y a une grosse dégradation du bois, les valeurs ne dépassent pas les valeurs initiales. Cette dégradation est représentée par le coefficient de perte, qui présente des valeurs plus faibles au fin du traitement.

À 280 °C, ses échantillons ont été cassés (la figure 38 - e montre la valeur du module quand il est prêt à casser), probablement, en raison des possibles glissements des ses molécules. Au contraire, l'*E.grandis* et l'*E.saligna*, même quand leurs modules atteignent des valeurs proches de zéro, les échantillons ne cassent pas et l'essai continue normalement. Après, les valeurs ne montent plus comme dans les autres essais car l'effet de la température par rapport à perte de masse est visible.

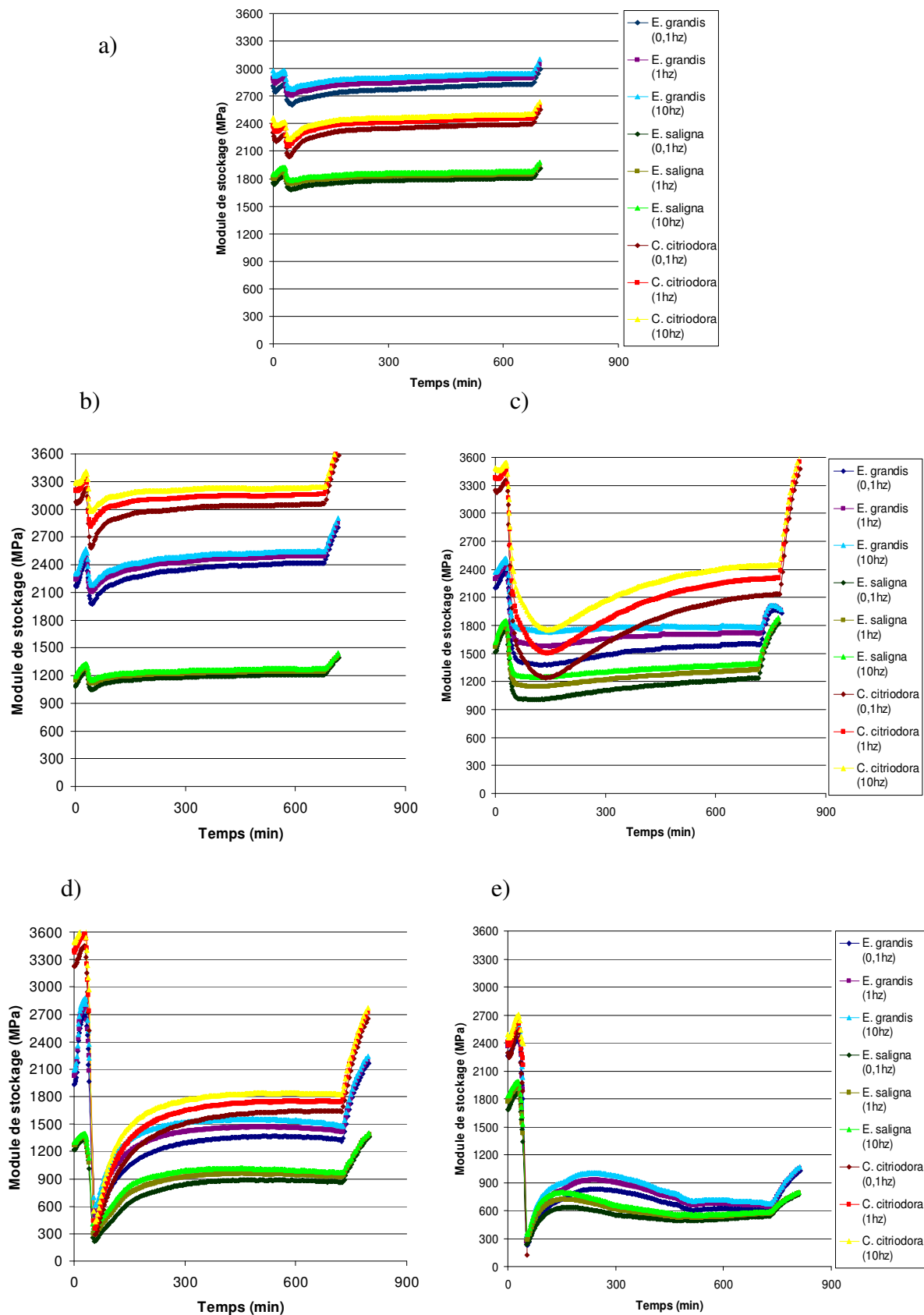


Figure 38 – Comparaison entre les trois espèces d'Eucalyptus soumises à l'essai (sans oxygène) de :

a – 140 °C ; b – 180 °C ; c – 220 °C ; d – 260 °C ; e - 280 °C au DMA

4.4.3. Comparaison entre les traitements : air X azote

Entre les trois traitements qui ont été faits avec l'air et l'azote, seul le troisième, à la température de 220 °C, montre une différence visible (Figure 39). Dans un premier temps, sur le bois d'*E.saligna* et de *C.citriodora*, le traitement avec azote a causé un ramollissement plus fort de leurs échantillons, représenté par une chute du module plus forte. Ensuite, la réticulation de la lignine est plus rapide pour le traitement avec air, tandis que l'azote présente une récupération plus faible et moins rapide. Ceci indique que l'air a causé un impact plus fort (si le module est plus élevé après un effet de température, l'échantillon est plus élastique et plus rigide grâce à la dégradation thermique). Lors de l'essai à 220 °C avec air, l'*E.grandis* a eu un comportement atypique (à 450 min d'essai les valeurs commencent à baisser).

Le comportement des courbes des deux essais est semblable. Ceci est plus visible dans la figure 39 - c car la variation des valeurs est la plus grande. Les courbes suivent une même tendance, néanmoins, avec valeurs différentes.

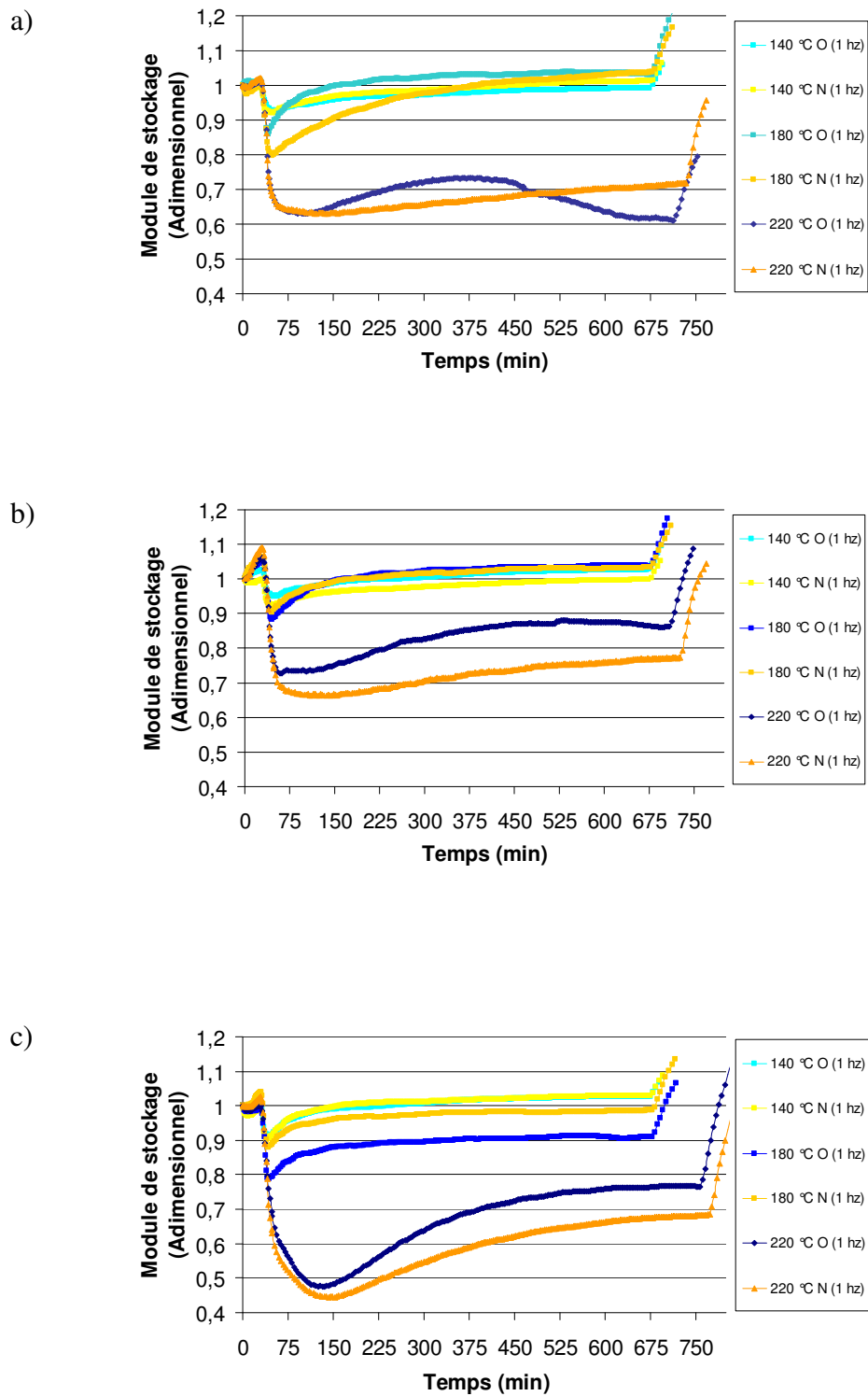


Figure 39 – Comparaison entre les traitements (Air X Azote) de : a – *E. grandis* ; b – *E. saligna* ;
c - *C. citriodora* en trois températures différentes et 1 fréquence

5. CONCLUSION

5.1. Analyses anatomiques et physiques du bois

La méthodologie utilisée dans ce travail a été efficace pour voir des différences anatomiques entre les espèces. Une relation liant l'épaisseur de la paroi des fibres et la taille du lumen à la densité des essences a été observée. À partir des résultats, il a été possible de conclure que les études des propriétés anatomiques sont importantes pour définir les finalités pratiques de l'utilisation du bois.

Les résultats des analyses des pourcentages duramen/aubier/écorce, des relations entre la densité avec la distance de la moelle et du facteur anisotropique ont présenté la même tendance que celle établie dans la bibliographie. Maintenant, il sera intéressant de saturer les échantillons déjà traités et calculer les facteurs anisotropiques sur le nouveau domaine hygroscopique afin de savoir si les retraits tangentiel et radial présentent des valeurs plus proches (bois le plus valorisé).

D'autre part, dans le domaine hygroscopique, la relation entre la distance de la moelle et les retraits (tangentiel, radial et volumique) au sein des espèces et entre espèces n'a pas été retrouvée. De même, de l'état anhydre jusqu'à la fin du traitement à 220 °C, cette même relation n'a pas été observée, les comportements des valeurs ont été aléatoires.

5.2. Analyse des propriétés physico-mécaniques des échantillons soumis à des essais au DMA

Ce travail a été réalisé au LERMAB dans le cadre des études rhéologiques sur le matériau bois. Ce laboratoire possède des dispositifs expérimentaux permettant la caractérisation du comportement physico-mécanique. L'étude a eu comme objectif d'établir une relation entre les variations des propriétés viscoélastiques en fonction de la température de traitement, de la densité du bois et de la composition de l'atmosphère de traitement.

Avec la méthodologie proposée, il a été possible d'apprendre que les altérations du module de stockage sont proportionnelles à la température. Les traitements avec l'air et avec l'azote ont révélé que c'est l'air qui a eu plus d'impact sur le bois à 220 °C.

Le choix des espèces a eu de l'importance également (deux espèces aux densités proches et une autre assez différente). Ceci a permis de trouver des points d'influence de la densité et, en plus, que les altérations ont été plus grandes pour le bois le plus dense et à une probable teneur en lignine la plus faible : *C.citriodora*. Ainsi, il serait intéressant de réaliser des analyses chimiques afin de connaître les teneurs en lignine, cellulose et hémicellulose et, ensuite, tester des essences de même densité mais aux teneurs en lignine différentes afin de confirmer si les altérations sont liées à la densité ou plutôt au taux de lignine.

Sachant que l'essai avec le DMA est très sensible, il sera intéressant de faire des essais de rigidité et poursuivre la recherche par des essais à température et humidité ambiantes sur les

échantillons qui ont déjà été traités thermiquement, afin de savoir des nouvelles conditions mécaniques du bois. De plus, il est encore intéressant de réaliser des essais de colorimétrie sur les échantillons afin de quantifier les changements de couleur entre les trois essences, entre deux atmosphères et entre différents traitements.

6. REFERENCES BIBLIOGRAFICAS

ALZATE (S. B. A.). - Caracterização da madeira de árvores de clones de *E. grandis*, *E. saligna* e *E. grandis X urophylla* - Piracicaba : Université de São Paulo, École Supérieure d'Agriculture "Luiz de Queiroz", 2004. - 133 p. (Thèse de doctorat).

Analyseur Mécanique Dynamique, Manuel d'utilisation, Vol. 1

Analyseur Mécanique Dynamique, Manuel d'utilisation, Vol. 2

AZEVEDO (A.C.S) ; QUIRINO (W.F). - Aumento da estabilidade da madeira de eucalipto através do tratamento térmico. - Revista da madeira, 2006, année 16, n° 98.

BARBER (R.K). - The structure of wood and its relationship to the chemical corrosion of wood. – Sidney : In. Forum of Australian Corrosion Association, Anais, 1978, pg 9.

BERRADA (E). - Recouvrance Hygro-Thermique du bois vert. – Montpellier : Université de Montpellier, 1991. – p. 36-42 (Thèse de doctorat).

BORGES (L.M.) ; QUIRINO (W.F.). - Redução do efeito das tensões de crescimento no *Eucalyptus grandis* pelo tratamento térmico. - III Seminário de produtos sólidos de madeira de eucaliptos, 2007.

BRITO (J.O.) ; GARCIA (J.N.) ; BORTOLETTO (G.J.) ; PESSOA (A.M.C.) ; SILVA (P.H.M.). - Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termoretificação. - Cerne, Lavras, 2006, vol. 12, n° 2, p. 182-188.

BRITO (J.O.) ; BARRICHELO (L.E.G.). - Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal : I Densidade e teor de lignina da madeira de Eucalipto. - IPEF, 1977, n° 14, p. 9-20.

CRUZ (C.R.) ; LIMA (J.T.) ; MUNIZ (G.I.B.). - Variações dentro das árvores e entre clones das propriedades físicas e mecânicas da madeira de híbridos de *Eucalyptus*. - Scientia Forestalis, 2003, n° 64, p. 33-47.

DURLO (M.A.) ; MARCHIORI (J.N.C.). - Tecnologia da madeira: retratibilidade. - Santa Maria : CEPEF/FATEC (Série técnica 10), 1992, p. 33.

EVANS (J.L.W.) ; SENFT (J.F.) ; GREEN (D.W.). - Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones. - Forest Products Journal, 2000, vol. 50, n° 7/8, pg. 75-87.

FERREIRA (C.A.) ; FREITAS (M.) ; FERREIRA (M.). - Densidade básica de plantações comerciais de Eucaliptos na região de Mogi-Guaçu. - IPEF, 1979, n° 18, p. 106-117.

FERREIRA (M.). - Escolha de espécies de eucalipto. - Circular Técnica IPEF, 1979, vol. 47, pg. 1-30.

GOMIDE (J.L.) ; COLODETTE (J.L.) ; CHAVES (R.O.) ; SILVA (C.M.). - Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. – Viçosa : Revista Árvore, 2005, vol. 29, n° 1, p. 129-137.

Instituto de pesquisas tecnológicas do Estado de São Paulo. – IPT Madeira: uso sustentável na construção civil. - São Paulo, 2003, IPT, p. 41-42.

KELLEY (S.S.) ; RIALS (T.G.) ; GLASSER (W.G.). - Relaxation behaviour of the amorphous components of wood. - Journal of Materials Science, 1987, vol. 22, p. 617-624.

LIMA (T.G.). - Variações nos sentidos radiais e longitudinais de algumas características das madeiras de *Eucalyptus microcorys* F. Muell e *Eucalyptus pilularis* Sm. – Viçosa : Université Federal de Viçosa, 1996, 106 p. (Thèse de Maître).

LOBÃO (M.S.) ; LÚCIA (R.M.D.) ; GOMES (A.) ; MOREIRA (M.S.S.). - Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de Eucalipto com diferentes densidades. - Viçosa : Revista Arvore, 2004, vol. 28, n° 6, p. 889-894.

MORI (F.A.) ; MENDES (L.M.) ; TRUGILHO (P.F.) ; CARDOSO (M.G.). - Utilização de eucaliptos e de madeiras nativas no armazenamento da aguardente de cana-de-açúcar. - Campinas : Ciência Tecnológica Alime., 2003, vol. 23, p. 3.

MOURA (M.C.O.). - Variações em características de crescimento e da madeira em clones de *Eucalyptus*. – Lavras : Université Federal de Lavras, 2000 (Thèse de Maître).

OLIVEIRA (J.T.S.) ; HELLMEISTER (J.C.) ; SIMÕES (J.W.) ; TOMAZELLO FILHO (M.). - Caracterização de sete espécies de eucaliptos para a construção civil. - Scientia Forestalis, 1999, n° 56, p. 113-124.

OLIVEIRA (J. T. S.) ; HELLMEISTER (J. C.) ; TOMAZELLO FILHO (M.). - Variação do teor da umidade e na densidade básica de sete espécies de Eucalipto. – Viçosa : Revista Árvore, 2005, vol. 29, n° 1, p. 115–127.

OLIVEIRA (J.T.S.) ; SILVA (J.C.). - Variação radial da retratibilidade e densidade básica de *Eucalyptus saligna*. – Viçosa : Revista Árvore, 2003, vol. 27, n° 3.

PERRÉ (P.) ; ROUSSET (P.) ; DONNOT (A.) ; MERLIN (A.) ; GÉRARDIN (P.) ; PASSARD (J.) ; PÉTRISSANS (M.) ; MOUGEL (E.) ; CHURSCIEL (L.) ; ZOULALIAN (A.) ; DAVRIEUX (F.) ; GIRARD (P.) ; TURNER (I.) ; BOIS (P.) ; EL BAKALI (I.) ; HAKKOU (M.) ; KOUCHADÉ (C.) ; PONCE (C.) ; ROTHARMEL (D.). - Amélioration des connaissances sur le traitement thermique du bois. - LERMAB et CIRAD-Forêt, 2004.

PESSOA (A.M.C.). - Termoretificação da madeira de *Eucalyptus grandis Hill Ex Maiden (Myrtaceae)* sub-metida ao cupim de madeira seca, *Cryptotermes brevis* (Walker, 1853) (Isoptera: *Kalotermitidae*) para tese de residência. – Piracicaba : Université de São Paulo, École Supérieur d'Agriculture "Luiz de Queiroz", 2002, 39 p. (Thèse de Maître).

PINCELLI (A.L.P.S.M.) ; BRITO (J.O.) ; CORRENTE (J.E.). - Avaliação da termoretificação sobre a colagem na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *Hondurensis*. - Scientia Forestalis, 2002, n° 61, p. 122-132.

PLACET (V.). - Conception et exploitation d'un dispositif expérimental innovant pour la caractérisation du comportement viscoelastique et de la dégradation thermique du bois dans des conditions sévères. Université Henri-Poincaré, 2006, 331 p. (Thèse de doctorat).

RAAD (T.J.) ; PINHEIRO (P.C.) ; YOSHIDA (M.I.). – Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do *Eucalyptus spp.* Lavras : Cerne, 2006, vol. 12, n° 2, p. 93-106.

ROCHA (F.T.) ; FLORSHEIM (S.M.B.) ; COUTO (H.T.Z.). - Variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis Hill ex Maiden* aos sete anos. – São Paulo : Revista do Instituto Florestal, 2004, vol. 16, n° 1, p. 43-55.

ROUSSET (P.). – Choix et validation expérimentale d'un modèle de pyrolyse pour le bois traité par haute température : de la micro-particule au bois massif. Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts (ENGREF), 2004, 182 p. (Thèse de doctorat).

SERPA (P.N.) ; VITAL (B.R.) ; LUCIA (R.M.D.) ; PIMENTA (A.S.). - Avaliação de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. – Viçosa : Revista Árvore, 2003, vol. 27, n° 5.

SILVA (J.C.) ; OLIVEIRA (J.T.S.) ; XAVIER (B.A.) ; CASTRO (V.R.). - Variação da retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, em função da idade e da posição radial no tronco. Viçosa : Revista Árvore, 2006, vol. 30, n° 5, p. 803-810.

SILVA (M.R.) ; MORI (F.A.) ; RABELO (G.F.) ; BRAGA (R.A.J.). - Interação da luz laser para a avaliação da textura de madeiras nativas e de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. Santa Maria : Ciência Florestal, 2005, vol. 15, n° 2, p. 167-175.

SKAAR (C). - Water in wood, Syracuse, Syracuse University Press, 1972, p. 318.

TOMAZELLO FILHO (M.). - Estrutura anatômica da madeira de oito espécies de eucalipto cultivadas no Brasil. – IPEF, 1985a, n° 29, p. 25-36.

TOMAZELLO FILHO (M.). - Variação da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *E. saligna* e *E. grandis*. IPEF, 1985b, n° 29, p. 37-45.

TOMAZELLO FILHO (M.). - Variação radial da densidade básica em estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus globulus*, *E.pellita* e *E.acmenioides*. IPEF, 1987, n° 36, p. 35-42.

LISTE DE CONTACTS

- ALMEIDA Giana
Post-Doctorante à l'ESALQ/USP
Propriétés physiques et anatomiques du bois/traitement thermique du bois
14, rue Girardet – CS 4216 – 54000 Nancy Cedex
TEL : 03 83 39 68 88
FAX : 03 83 39 68 47
Mail : almeida@nancy-engref.inra.fr

- ASSOR Carole
Etude du déterminisme de la paroi du bois sur ses propriétés macroscopiques
Laboratoire d'Études et de Recherche sur le Matériau Bois – LERMAB
14, rue Girardet – CS 4216 – 54000 Nancy Cedex
TEL : 03 83 39 68 93
FAX : 03 83 39 68 47
Mail : assor@nancy-engref.inra.fr

- GHAZIL Saloua
Doctorante (Thèse) : Migration des liquide dans le bois
Laboratoire d'Études et de Recherche sur le Matériau Bois – LERMAB
14, rue Girardet – CS 4216 – 54000 Nancy Cedex
TEL : 03 83 39 68 88
FAX : 03 83 39 68 47
Mail : ghazil@nancy-engref.inra.fr

- HOUNGAN Comlam Aristide
Thèse de Doctorat en Alternance entre le Bénin (EPAC/UAC) et la France (ENGREF/LERMAB)
Caractérisation hygroscopique des matériaux locaux de Construction au BENIN
BP 175, Aboney Calair/Cotonou/Benin
TEL : 00(229) 21 00 46 72
FAX : (229) 22 41 18 49
Mail : hounaris@yahoo.fr

- HUBER Françoise
Ingénieur de recherches ; spécialiste de l'anatomie du bois
Institut National de la Recherche Agronomique – Nancy
Laboratoire d'Études et de Recherche sur le Matériau Bois – LERMAB
14, rue Girardet – CS 4216 – 54000 Nancy Cedex
TEL :
FAX : 03 83 39 68 47
Mail : huber@nancy-engref.inra.fr

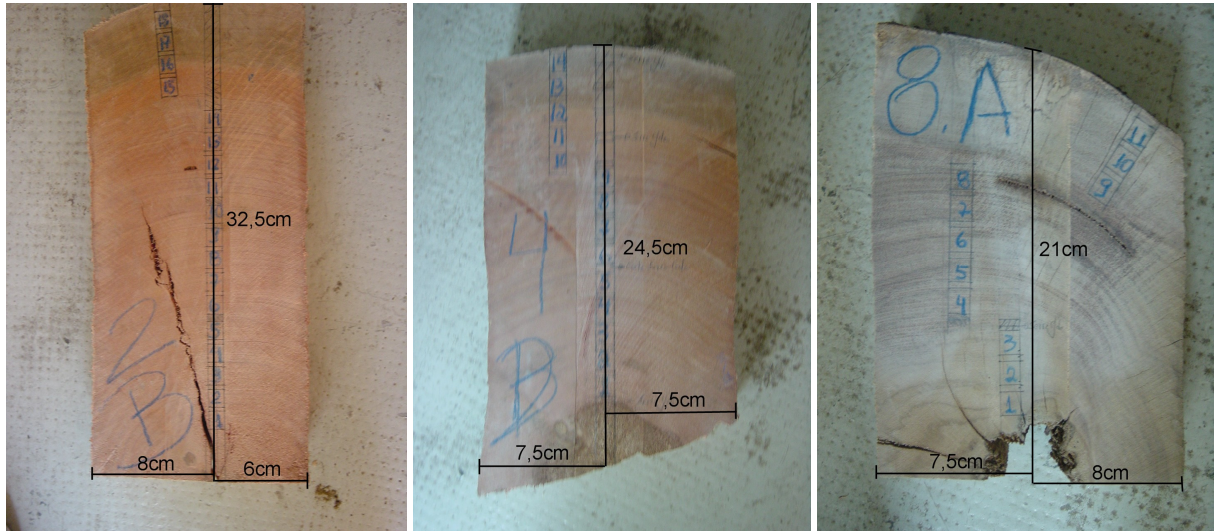
- PERRE Patrick
Professeur et directeur du Laboratoire d'Études et de Recherche sur le Matériau Bois – LERMAB;
spécialiste en séchage du bois.
École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts (ENGREF)
14, rue Girardet – CS 4216 – 54000 Nancy Cedex
TEL : 03 83 39 68 92
FAX : 03 83 39 68 47
Mail : perre@engref.fr

- REMOND Romain
Post-doctorant ; Thématique de recherche : Approche déterministe du séchage du bois.
Laboratoire d'Études et de Recherche sur le Matériau Bois – LERMAB
14, rue Girardet – CS 4216 – 54000 Nancy Cedex
TEL : 03 83 39 68 88
FAX : 03 83 39 68 47
Mail : remond@nancy-engref.inra.fr

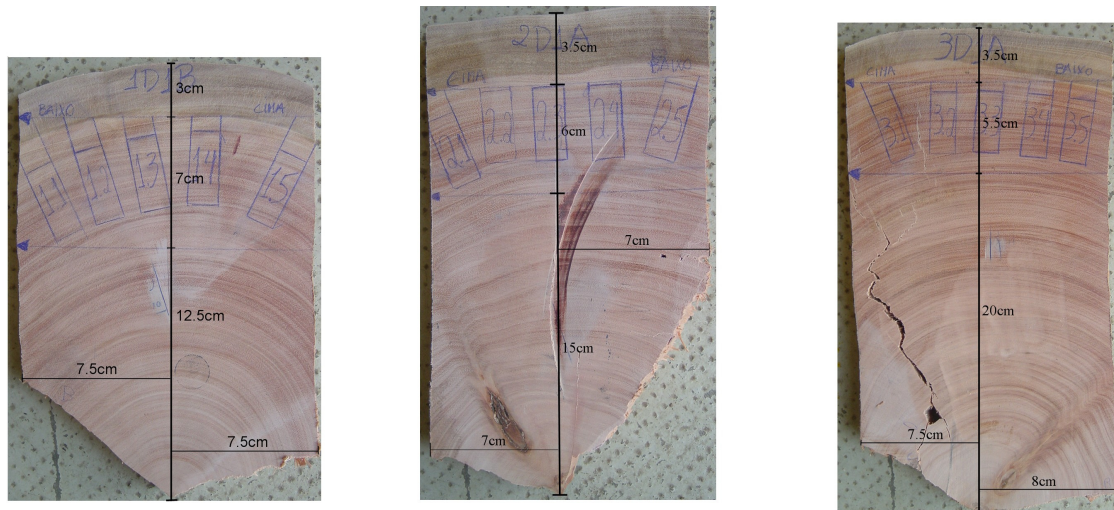
- TOMAZELLO Mario Filho
Professeur et chercheur ; spécialiste en dendrologie, anatomie et identification du bois.
Université de Sao Paulo – École Supérieure d'Agriculture "Luiz de Queiroz" (USP-ESALQ)
Laboratoire de Dendrologie, Anatomie et Identification du bois.
Av. Padua Dias, 11
CEP : 13418-900 Piracicaba-SP, Brésil
TEL : + 55 19 2105 - 8623
FAX : + 55 19 2105 - 8601
Mail : mtomazel@esalq.usp.br

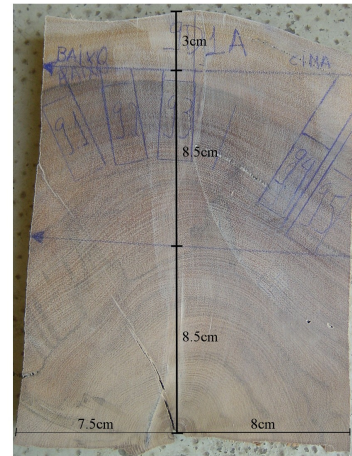
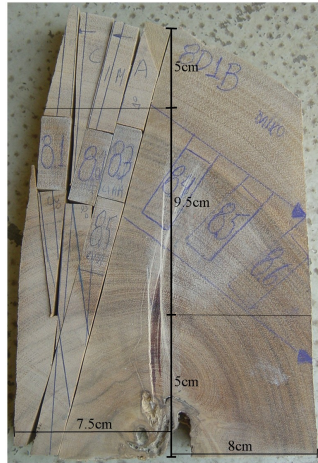
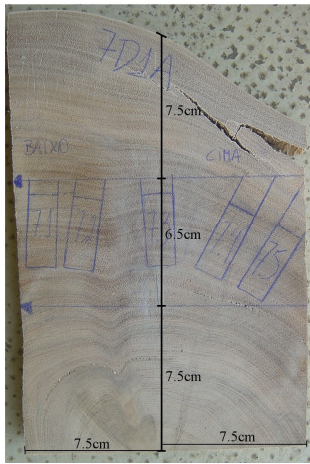
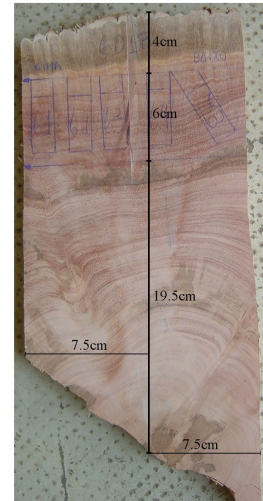
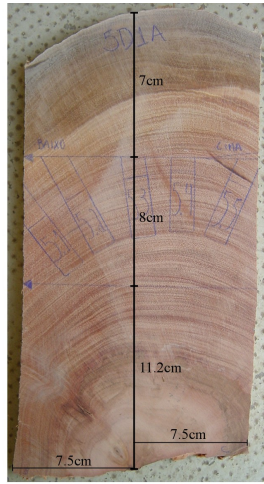
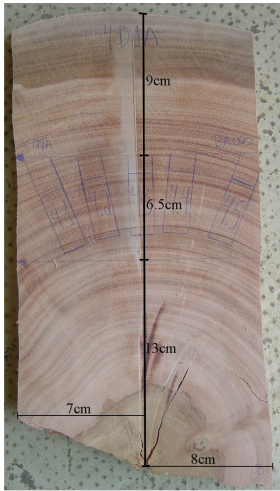
7. ANNEXES

Annexe 1-) Photos des 3 barreaux (de gauche à droite : *E. grandis*, *E. saligna*, *C. citriodora*) avec localisation des échantillons pour les essais de retrait le long du rayon :



Annexe 2-) Photos des barreaux des 9 arbres avec localisation des échantillons pour les essais en DMA (la première photo à gauche est l'arbre 1 et la dernière à droite numéro 9. Les chiffres marqués dans les barreaux indiquent le numéro de l'arbre) (1 à 3 – *E. grandis*; 4 à 6 – *E. saligna* et 7 à 9 – *C. citriodora*) :





Annexe 3-) Les traitements thermiques du bois et leur durée

Tableau 7 – Traitement à 140 °C

Étape	Traitement: 140 °C	Témp. final (°C)	Temps (min)
1	Isotherme	100	30
2	Monter 10 °C/min jusqu'à température d'essai	140	4
3	Isotherme	140	5
4	Isotherme	140	1
5	Alterner des fréquences	140	Variable
6	Répéter étape 4 et 5 (250 fois)	140	Variable
7	Isotherme	140	0,5
8	Alterner des fréquences	140	Variable
9	Ajouter (-10°C)	130	1
10	Répéter les étapes 7, 8 e 9 jusqu'a 90 °C	90	Variable
			Total : 705

Tableau 8 – Traitement à 180 °C

Étape	Traitement: 180 °C	Témp. final (°C)	Temps (min)
1	Isotherme	100	30
2	Monter 10 °C/min jusqu'à 180 °C	180	8
3	Isotherme	180	5
4	Isotherme	180	1
5	Alterner des fréquences	180	Variable
6	Répéter étape 4 et 5 (250 fois)	180	Variable
7	Isotherme	180	0,5
8	Alterner des fréquences	180	Variable
9	Ajouter (-10°C)	170	3,5
10	Répéter les étapes 7, 8 e 9 jusqu'a 90 °C	90	Variable
			Total : 730

Tableau 9 – Traitement à 220 °C

Étape	Traitement: 220 °C	Témp. final (°C)	Temps (min)
1	Isotherme	100	30
2	Monter 10 °C/min jusqu'à 220 °C	220	12
3	Isotherme	220	5
4	Isotherme	220	1
5	Alterner des fréquences	220	Variable
6	Répéter étape 4 et 5 (250 fois)	220	Variable
7	Isotherme	220	0,5
8	Alterner des fréquences	220	Variable
9	Ajouter (-10°C)	210	1
10	Répéter les étapes 7, 8 e 9 jusqu'a 90 °C	90	Variable
			Total : 780

Tableau 10 – Traitement à 260 °C

Étape	Traitement: 260 °C	Témp. final (°C)	Temps (min)
1	Isotherme	100	30
2	Monter 10 °C/min jusqu'à 260 °C	260	16
3	Isotherme	260	5
4	Isotherme	260	1
5	Alterner des fréquences	260	Variable
6	Répéter étape 4 et 5 (250 fois)	260	Variable
7	Isotherme	260	0,5
8	Alterner des fréquences	260	Variable
9	Ajouter (-10°C)	250	1
10	Répéter les étapes 7, 8 e 9 jusqu'a 90 °C	90	Variable
			Total : 820

Tableau 11 – Traitement à 280 °C

Étape	Traitement: 280 °C	Témp. final (°C)	Temps (min)
1	Isotherme	100	30
2	Monter 10 °C/min jusqu'à 280 °C	280	28
3	Isotherme	280	5
4	Isotherme	280	1
5	Alterner des fréquences	280	Variable
6	Répéter étape 4 et 5 (250 fois)	280	Variable
7	Isotherme	280	0,5
8	Alterner des fréquences	280	Variable
9	Ajouter (-10°C)	270	1
10	Répéter les étapes 7, 8 e 9 jusqu'a 90 °C	90	Variable
			Total : 845

Annexe 4-) Tableaux comparatifs entre les modules de stockages initiaux (dernier moment des échantillons soumis à température de 100 °C). Les échantillons du traitement à 60 °C n'ont pas subi ce processus. Les 3 premiers sont les tableaux des traitements avec air et les 3 derniers avec azote.

<i>E. grandis</i>	Module (MPa)	Moyenne/arbre	Ecart-type/arbre	Moyenne/espèce (MPa)
Arb. 1	2235,17	2151,256667	148,5492485	2226,176667
	1979,74			
	2238,86			
Arb. 2	2825,83	2226,893333	533,7493453	Ecart-type/espèce
	2053,3			
	1801,55			
Arb. 3	2725,93	2300,38	551,2481337	396,0774008
	2497,55			
	1677,66			

<i>E. saligna</i>	Module (MPa)	Moyenne/arbre	Ecart-type/arbre	Moyenne/espèce (MPa)
Arb. 4	1657,77	1766,06	203,4579836	1897,676667
	1639,65			
	2000,76			
Arb. 5	1456,71	1715,976667	404,9569649	Ecart-type/espèce
	1508,6			
	2182,62			
Arb. 6	2642,8	2210,993333	392,9519538	381,6262204
	2115,79			
	1874,39			

<i>C. citriodora</i>	Module (MPa)	Moyenne/arbre	Ecart-type/arbre	Moyenne/espèce (MPa)
Arb. 7	3342,62	2644,456667	614,0525308	2631,153333
	2402,55			
	2188,2			
Arb. 8	2402,74	2691,62	532,4542621	Ecart-type/espèce
	3306,08			
	2366,04			
Arb. 9	2494,21	2557,383333	552,1172996	494,8015709
	2039,57			
	3138,37			

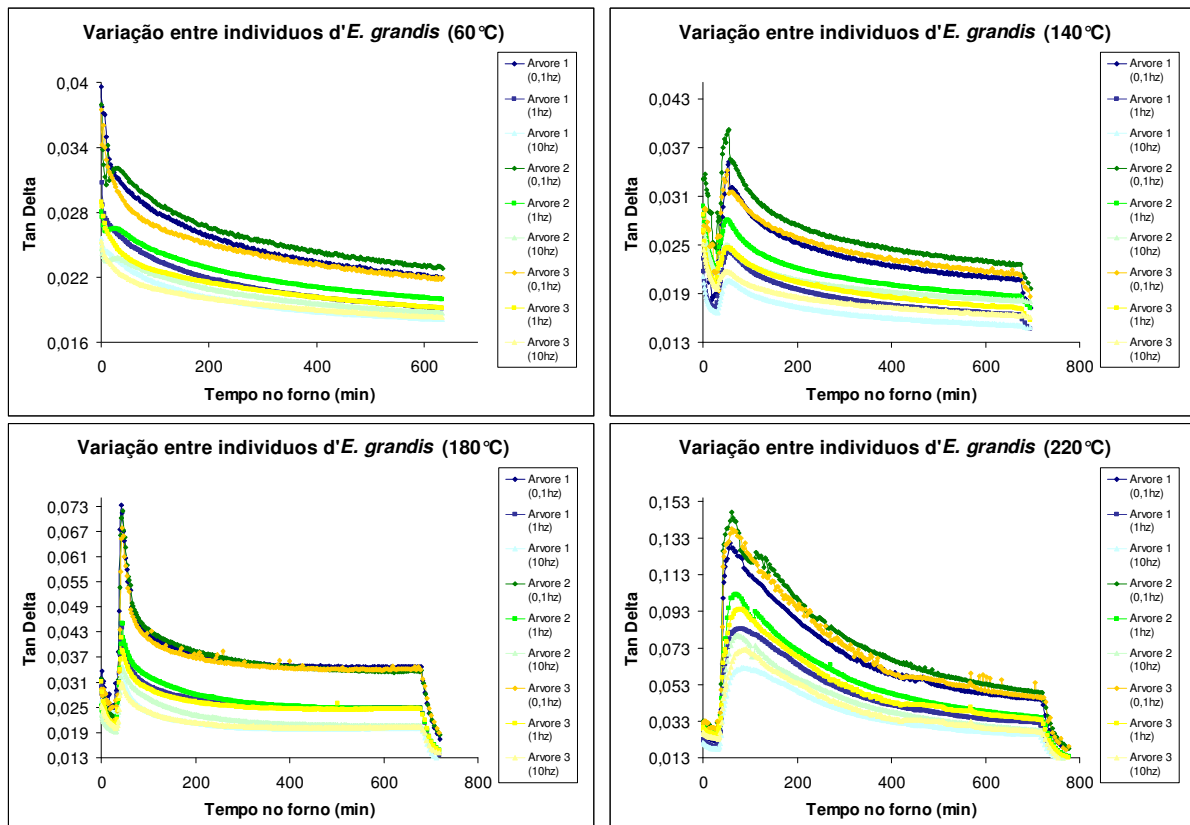
<i>E. grandis</i>	Module (MPa)	Moyenne/arbre	Ecart-type/arbre	Moyenne/espèce (MPa)
Arb. 1	1930,83	1981,286	209,7361071	2271,551333
	1685,57			
	2116,83			
	1935,92			
	2237,28			
Arb. 2	2617,62	2273,048	330,4538932	Ecart-type/espèce
	2467,47			
	2418,13			
	2043,35			
	1818,67			
Arb. 3	2827,79	2560,32	195,6622535	289,5199014
	2438,21			
	2378,84			
	2707,02			
	2449,74			

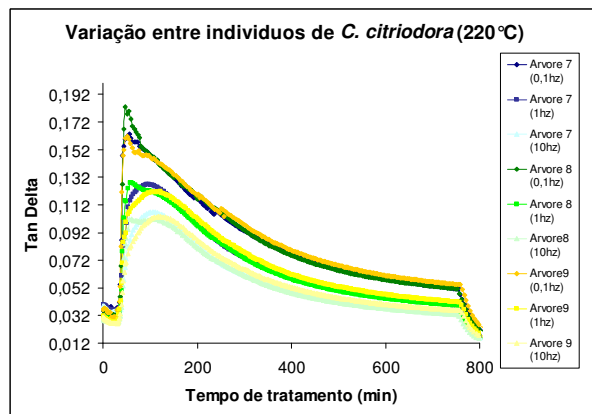
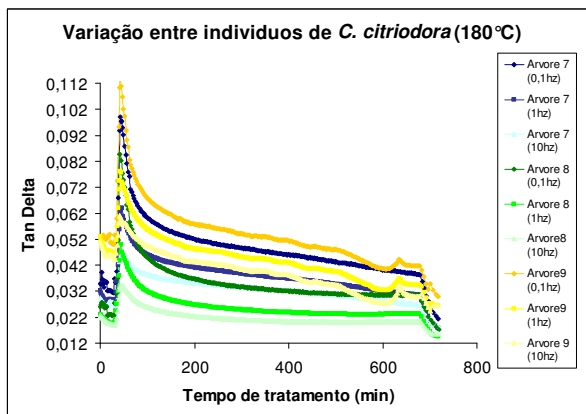
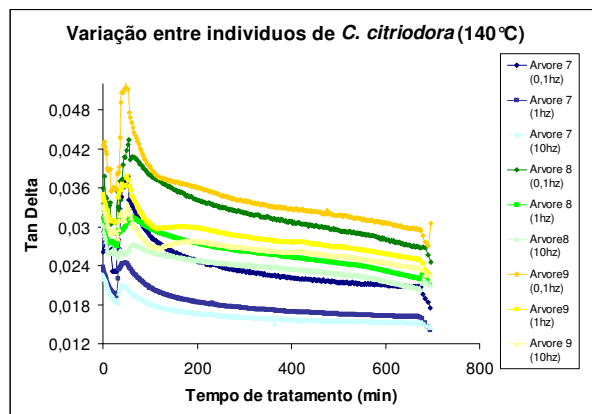
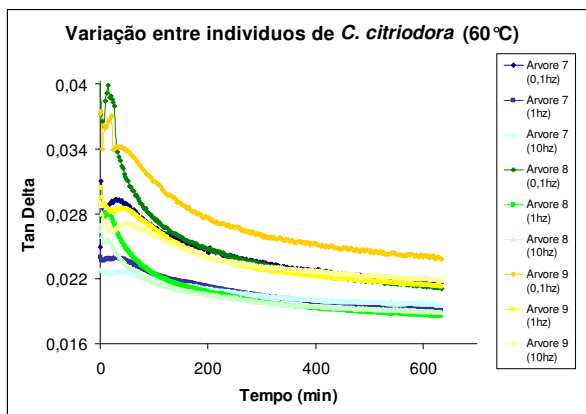
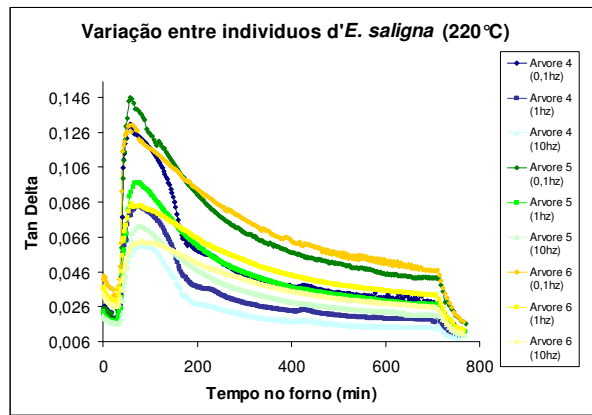
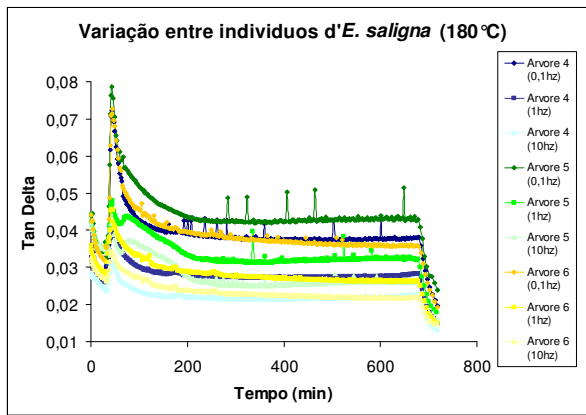
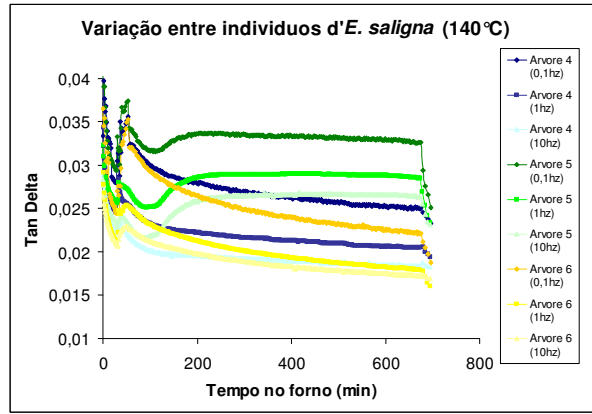
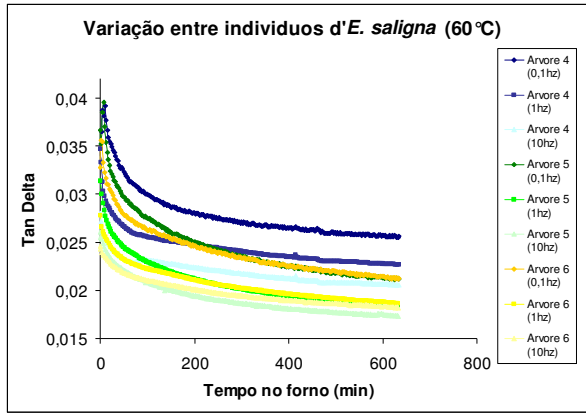
<i>E. saligna</i>	Module (MPa)	Moyenne/arbre	Ecart-type/arbre	Moyenne/espèce (MPa)
Arb. 4	1832,63	1604,18	290,6175631	1810,17
	1249,09			
	1748,11			
	1332,2			
	1858,87			
Arb. 5	1584,66	1775,69	346,5563805	Ecart-type/espèce
	1714,53			
	2159,93			
	1332,96			
	2086,37			
Arb. 6	2567,96	2050,64	533,7907725	225,2183068
	2080,31			
	1584,49			
	2580,6			
	1439,84			

<i>C. citriodora</i>	Module (MPa)	Moyenne/arbre	Ecart-type/arbre	Moyenne/espèce (MPa)
Arb. 7	2883,53	2620,742	484,9597156	2728,450667
	2162,71			
	2700,7			
	2108,8			
	3247,97			
Arb. 8	2454,25	2640,55	404,3592823	Ecart-type/espèce
	2536,07			
	2463,97			
	3357,97			
	2390,49			
Arb. 9	2277,8	2924,06	498,1793507	169,6919199
	3226,07			
	3138,37			
	3452,44			
	2525,62			

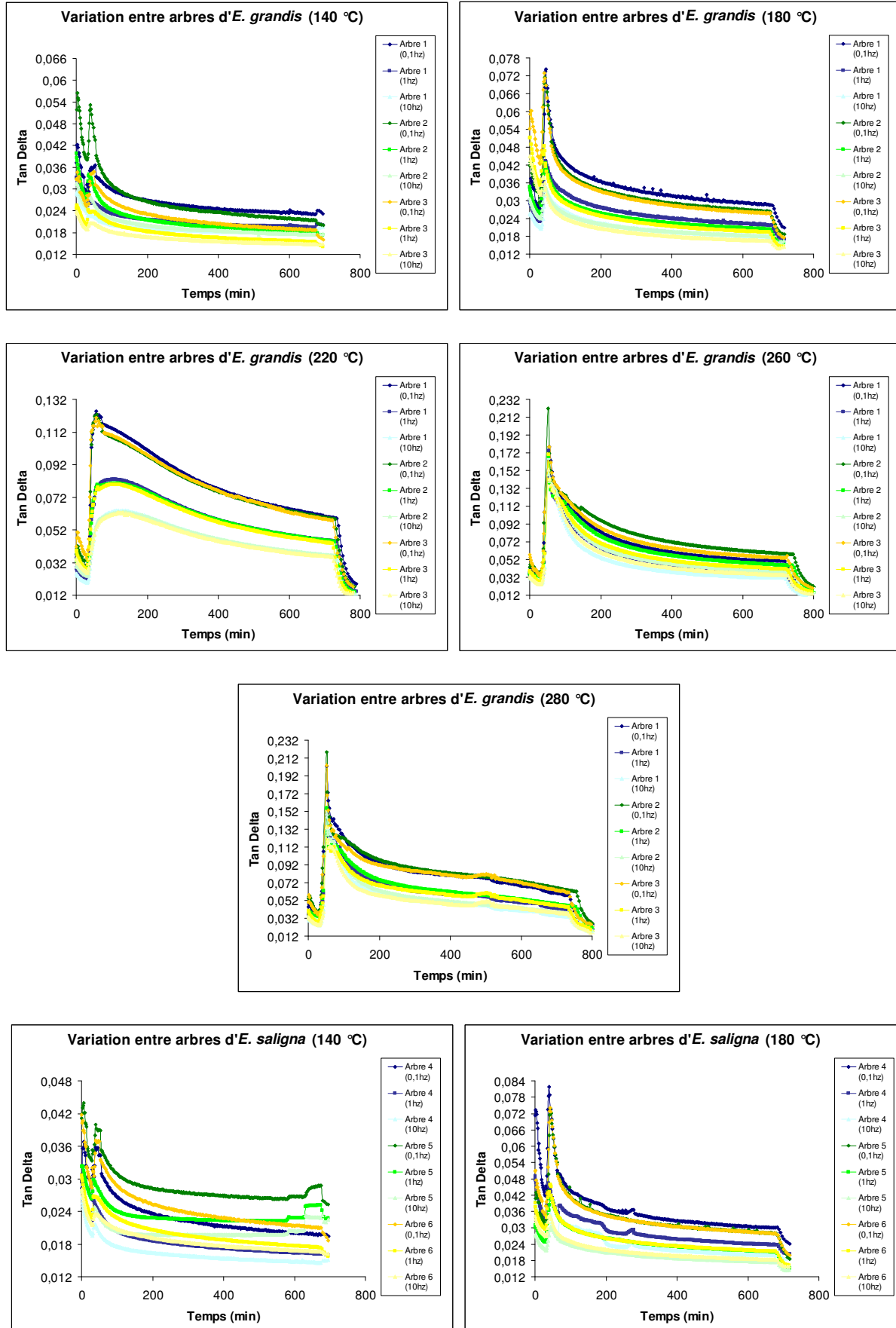
Annexe 5-) Graphiques comparatifs entre les trois arbres de chaque essence (tan δ)

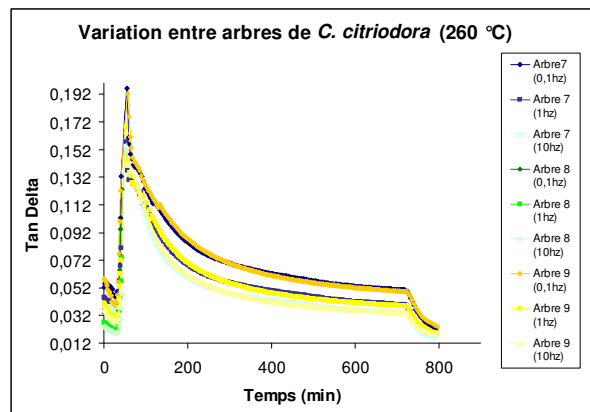
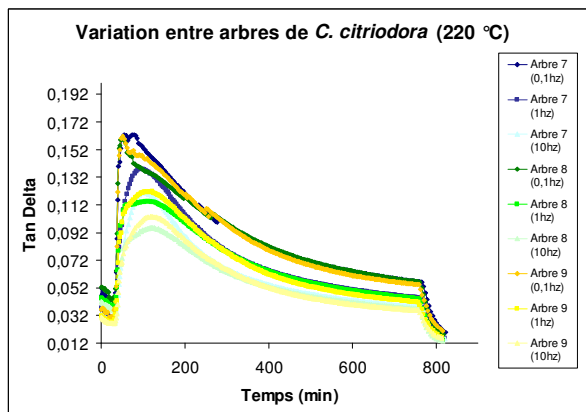
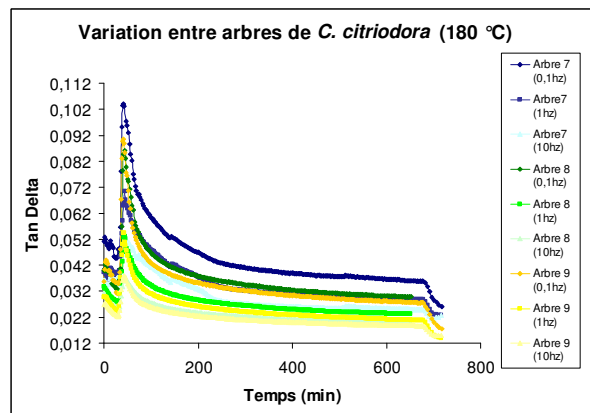
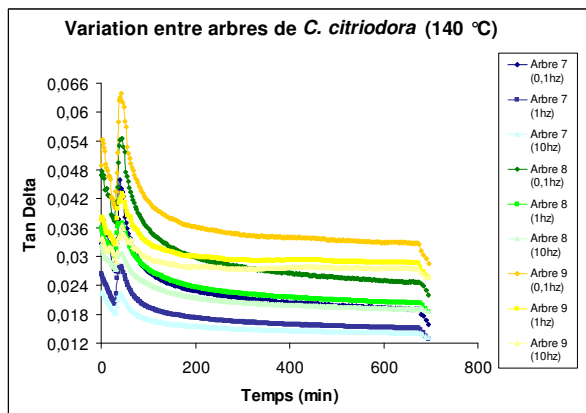
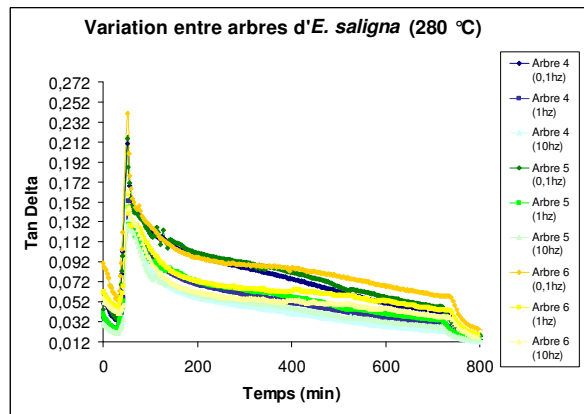
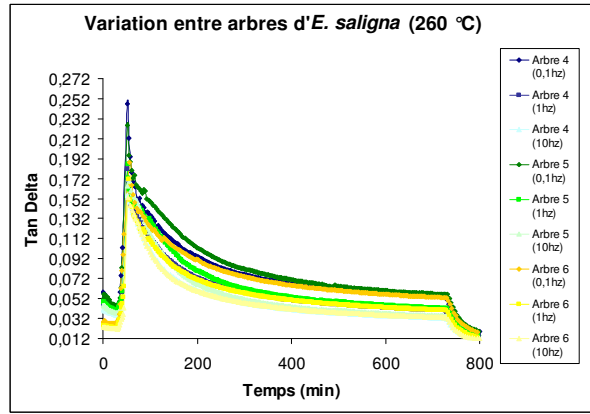
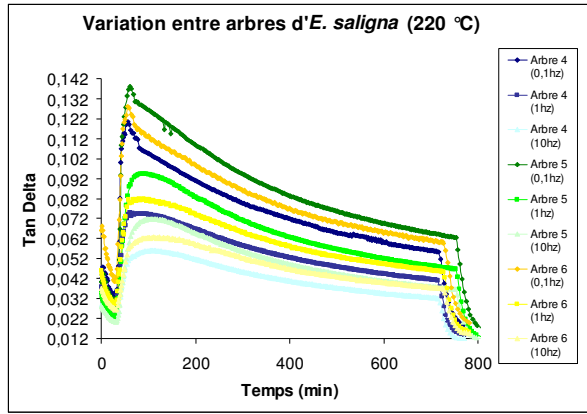
a) Choix de l'arbre pour l'analyse des résultats des essais avec air





b) Choix de l'arbre pour l'analyse des résultats des essais avec azote





Annexe 6-) Tableaux des valeurs de densité anhydre, retraits et facteur d'anhyotropie du point de saturation à l'état anhydre.

<i>E. grandis</i> - Échantillon	Densité anhydre (g/cm ³)	Retrait Tang. (%)	Retrait Rad. (%)	Relation T/R	Retrait Vol. (%)
1 - Moelle	0,562	10,069	5,162	1,950	14,712
2	0,603	10,137	5,620	1,804	15,187
3	0,567	10,207	5,710	1,787	15,334
4	0,618	10,392	5,373	1,934	15,207
5	0,584	10,016	5,665	1,768	15,113
6	0,651	10,835	6,834	1,585	16,929
7	0,556	9,722	4,706	2,066	13,970
8	0,614	11,420	5,721	1,996	16,488
9	0,622	11,798	5,787	2,038	16,902
10	0,666	11,943	6,229	1,917	17,428
11	0,836	9,284	5,731	1,620	14,483
12	0,828	9,407	5,163	1,822	14,085
13	0,857	9,916	5,145	1,927	14,551
14	0,850	9,500	5,551	1,711	14,523
15	0,849				
16	0,821	9,319	4,957	1,880	13,814
17	0,766	7,894	3,965	1,991	11,546
18 - Écorce	0,759	8,294	4,918	1,687	12,804

<i>E. saligna</i> - Échantillon	Densité anhydre (g/cm ³)	Retrait Tang. (%)	Retrait Rad. (%)	Relation T/R	Retrait Vol. (%)
1 - Moelle	0,503	9,126	3,334	2,737	12,156
2	0,543	9,804	4,157	2,358	13,554
3	0,640	11,543	5,662	2,039	16,552
4	0,637	9,763	4,842	2,016	14,133
5	0,736	11,549	6,189	1,866	17,024
6	0,764	10,446	6,289	1,661	16,078
7	0,808	8,990	5,485	1,639	13,982
8	0,860	7,398	4,839	1,529	11,879
9	0,849	8,254	4,782	1,726	12,641
10	0,868	7,343	5,153	1,425	12,118
11	0,819	7,077	3,289	2,152	10,133
12	0,804	7,325	4,430	1,654	11,430
13	0,761	13,453	5,391	2,495	18,119
14 - Ecorce	0,700	15,394	4,437	3,469	19,148

Analyse des propriétés physiques, mécaniques et anatomiques du bois d'Eucalyptus

<i>C. citriodora</i> - Échantillon	Densité anhydre (g/cm ³)	Retrait Tang. (%)	Retrait Rad. (%)	Relation T/R	Retrait Vol. (%)
1 - Moelle	0,855	8,739	4,399	1,987	12,753
2	0,805	9,633	5,585	1,725	14,680
3	0,790	9,264	4,492	2,062	13,340
4	0,899	10,117	5,771	1,753	15,304
5	0,893	9,411	5,460	1,724	14,357
6	0,915	9,377	5,428	1,728	14,296
7	0,959	8,703	5,670	1,535	13,880
8	0,972	8,572	5,259	1,630	13,380
9	0,843	8,815	5,714	1,543	14,026
10	0,835	8,744	6,181	1,415	14,384
11 - Écorce	0,839	9,373	6,405	1,463	15,178

Annexe 7-) Tableaux des valeurs de densité anhydre, des retraits et des relations T/R de l'état anhydre jusqu'à la fin du traitement thermique à 220 °C

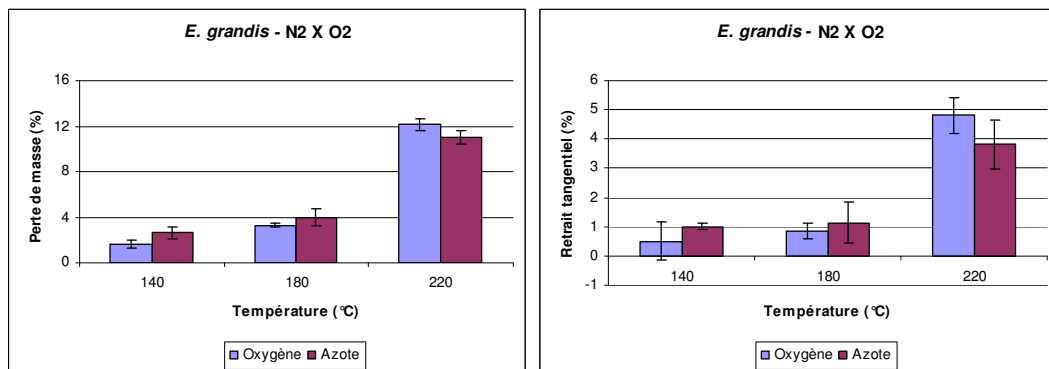
<i>E. grandis</i> - Échantillon	Densité anhydre (g/cm ³)	Retrait Tang. (%)	Retrait Rad. (%)	Relation T/R	Retrait Vol. (%)
1 - Moelle	0,562	2,406	1,434	1,678	3,806
2	0,603	2,702	1,445	1,870	4,107
3	0,567	2,335	1,814	1,287	4,107
4	0,618	2,383	1,576	1,512	3,921
5	0,584	2,355	1,552	1,517	3,870
6	0,651	2,784	1,682	1,656	4,419
7	0,556	2,271	1,110	2,045	3,356
8	0,614	2,645	1,561	1,694	4,164
9	0,622	2,635	1,299	2,028	3,900
10	0,666	2,260	1,299	1,740	3,530
11	0,836	2,575	1,364	1,888	3,904
12	0,828	3,150	1,265	2,489	4,375
13	0,857	3,453	1,386	2,492	4,791
14	0,850	3,026	1,506	2,009	4,486
15	0,849	3,034	1,206	2,516	4,203
16	0,821	3,115	1,143	2,726	4,222
17	0,766				
18 - Écorce	0,759	2,519	1,117	2,256	3,608

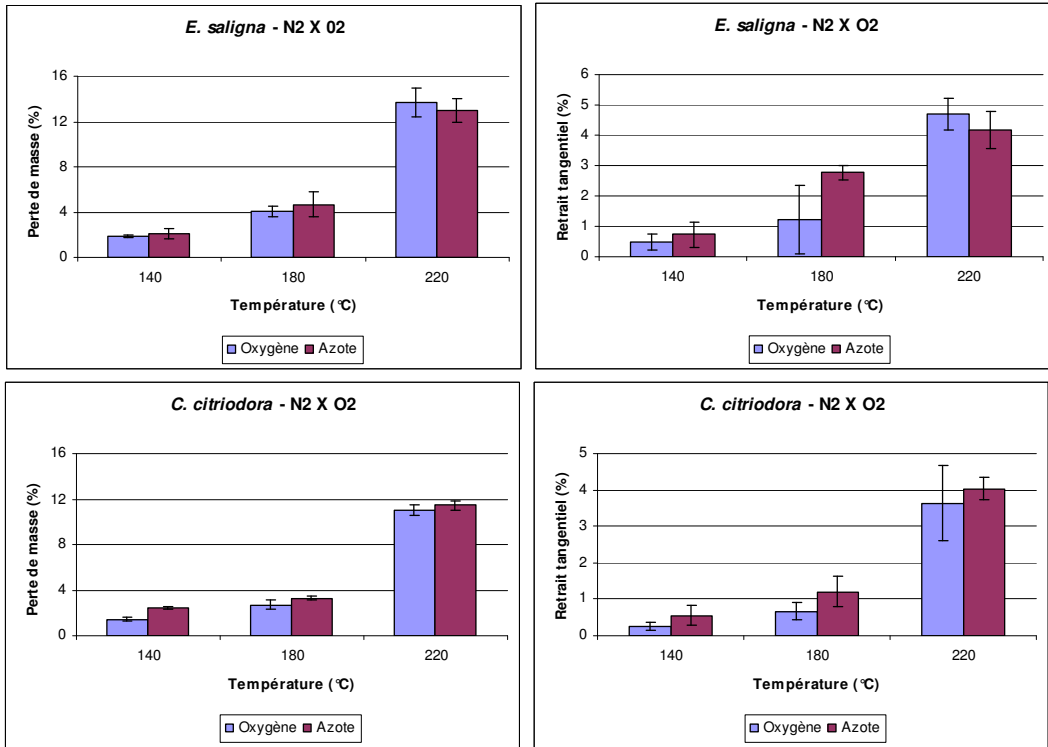
<i>E. saligna</i> - Échantillon	Densité anhydre (g/cm ³)	Retrait Tang. (%)	Retrait Rad. (%)	Relation T/R	Retrait Vol. (%)
1 - Moelle	0,503	2,519	0,679	3,713	3,181
2	0,543	1,893	0,781	2,425	2,659
3	0,640	2,837	1,236	2,296	4,037
4	0,637	2,625	1,192	2,202	3,786
5	0,736	2,569	1,447	1,775	3,978
6	0,764	2,729	1,629	1,675	4,313
7	0,808	2,233	1,377	1,621	3,579
8	0,860	2,031	1,783	1,139	3,777
9	0,849	3,088	1,255	2,460	4,305
10	0,868	2,579	1,473	1,751	4,015
11	0,819	2,773	0,807	3,436	3,557
12	0,804	2,486	1,477	1,683	3,927
13	0,761	2,813	1,257	2,238	4,034
14 - Ecorce	0,700	2,136	1,060	2,014	3,174

<i>C. citriodora</i> - Échantillon	Densité anhydre (g/cm ³)	Retrait Tang. (%)	Retrait Rad. (%)	Relation T/R	Retrait Vol. (%)
1 - Moelle	0,855	0,912	1,893	0,482	2,788
2	0,805				
3	0,790	3,664	2,103	1,742	5,690
4	0,899	0,941	2,689	0,350	3,604
5	0,893	1,942	2,682	0,724	4,571
6	0,915	0,324	2,430	0,133	2,747
7	0,959	1,514	2,872	0,527	4,343
8	0,972	0,800	2,451	0,326	3,231
9	0,843	2,793	1,934	1,445	4,673
10	0,835	3,214	1,979	1,624	5,130
11 - Écorce	0,839	3,047	2,202	1,384	5,182

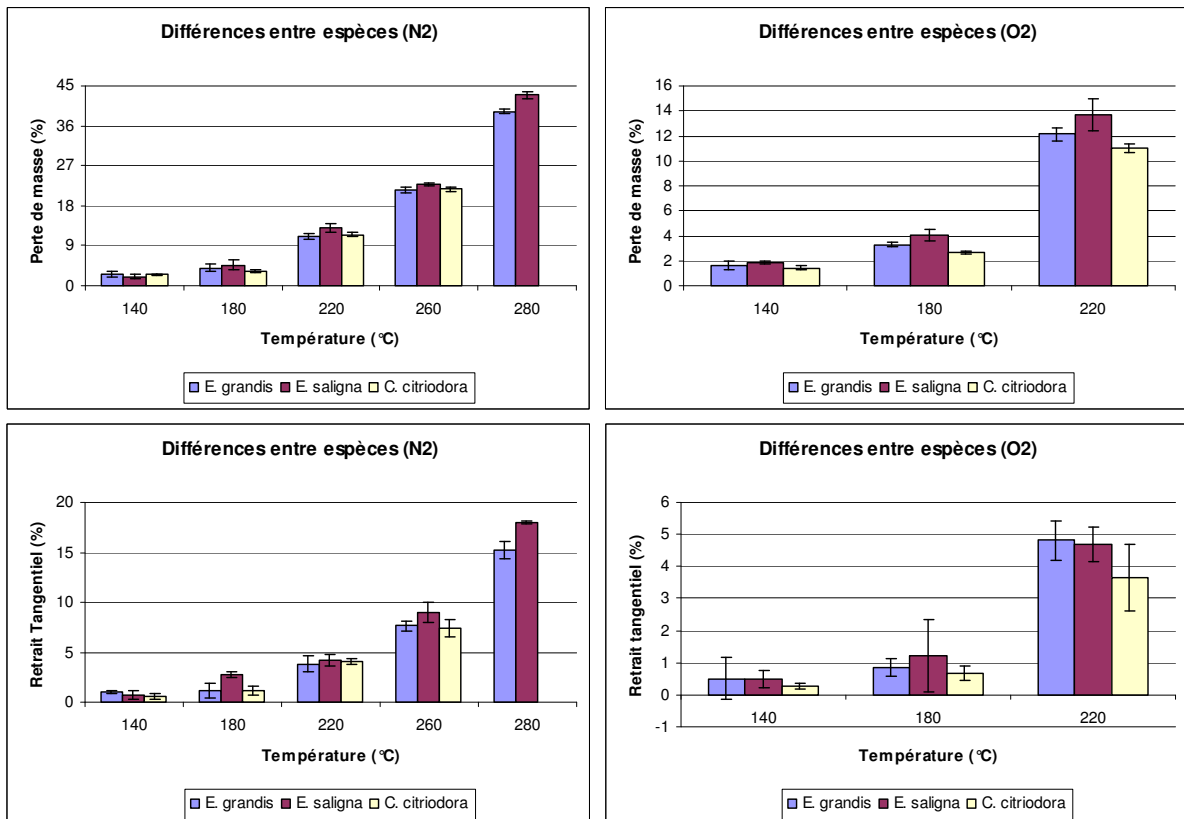
Annexe 8-) Perte de masse et retrait tangentiel des échantillons soumis au DMA

a) Graphiques comparatifs des pertes de masse et des retraits tangentiels entre les traitements avec air et avec azote





b) Graphiques comparatifs des pertes de masse et des retraits tangentiels entre les espèces, avec et sans oxygène



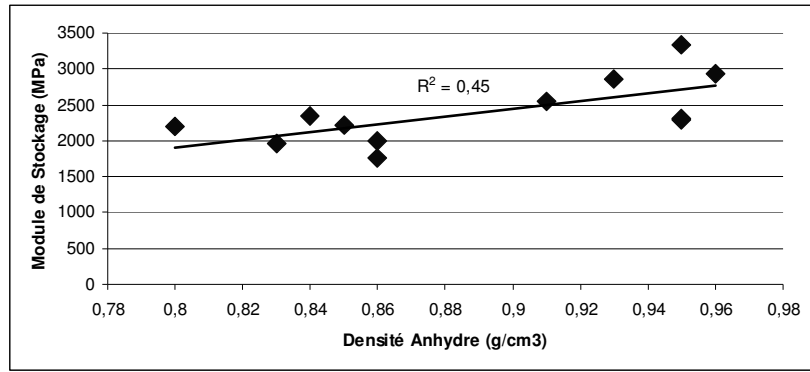
Annexe 9-) Valeurs des coefficients de pertes avant et après le traitement au DMA (à fréquence de 0,1 Hz)

Air - Variation des coefficients de perte				
Température (°C)		<i>E. grandis</i>	<i>E. saligna</i>	<i>C. citriodora</i>
60	Avant	0,039	0,033	0,041
	Après	0,021	0,021	0,021
140	Avant	0,023	0,037	0,036
	Après	0,017	0,019	0,025
180	Avant	0,032	0,044	0,026
	Après	0,017	0,019	0,017
220	Avant	0,027	0,042	0,032
	Après	0,017	0,017	0,020

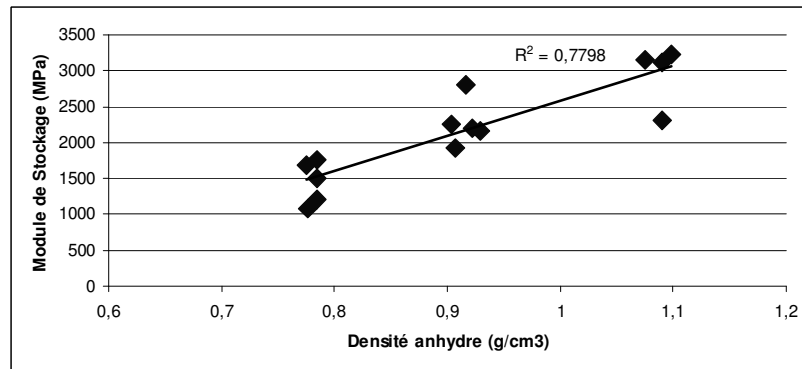
Azote - Variations des coefficients de perte				
Température (°C)		<i>E. grandis</i>	<i>E. saligna</i>	<i>C. citriodora</i>
140	Avant	0,033	0,028	0,049
	Après	0,016	0,019	0,029
180	Avant	0,054	0,071	0,036
	Après	0,018	0,024	0,017
220	Avant	0,042	0,037	0,036
	Après	0,017	0,018	0,021
260	Avant	0,058	0,059	0,058
	Après	0,020	0,019	0,024
280	Avant	0,050	0,050	-
	Après	0,021	0,017	-

Annexe 10-) Valeurs de densité anhydre de chaque échantillon et graphiques du module de stockage par rapport aux valeurs de densité (Air : tableau et graphique ; azote : tableau et graphique)

Valeurs de densité de chaque échantillon (g/cm³) –AIR			
Température °C	<i>E. grandis</i>	<i>E. saligna</i>	<i>C. citriodora</i>
60	0,84	0,93	0,96
140	0,8	0,91	0,95
180	0,83	0,86	0,95
220	0,85	0,86	0,95



Valeurs de densité de chaque échantillon (g/cm³) – AZOTE			
Température °C	<i>E. grandis</i>	<i>E. saligna</i>	<i>C. citriodora</i>
140	0,9168	0,784	1,09
180	0,9297	0,776	1,09
220	0,9227	0,785	1,075
260	0,907	0,785	1,098
280	0,904	0,775	



Annexe 11-) Humidité des échantillons soumis au traitement à 60 °C (avec utilisation du gel de silice en dessiccateur pour absorber l'humidité)

Traitements 60 °C			
Arbres	Masse avant (g)	Masse anhydre (g)	Humidité (%)
1	1,0529	1,0309	2,0895
2	1,1143	1,0966	1,5884
3	1,0053	0,9841	2,1088
4	0,9140	0,8983	1,7177
5	0,9914	0,9684	2,3200
6	1,1547	1,1315	2,0092
7	1,3081	1,2890	1,4601
8	1,2158	1,1873	2,3441
9	1,3253	1,3034	1,6525

RESUME

Actuellement, à cause de tous les problèmes environnementaux qui existent, il est important de préserver les forêts. Dans ce contexte, les effets du traitement thermique sur le bois doivent être d'avantage étudiés car c'est une alternative d'amélioration des qualités du bois issu de forêt de production. De plus, la caractérisation de la structure anatomique du bois nous a permis de connaître les utilisations de chaque type de bois. Le présent travail a donc permis d'étudier les effets de la réтификаtion ((i) différentes températures dans la même espèce ; (ii) différentes espèces à la même température et (iii) deux gaz différents, air et azote) et les caractéristiques anatomiques ((iv) variation des proportions de duramen/aubier/écorce le long du tronc ; (v) épaisseur des parois et diamètre des lumen ; (vi) variations des retraits tout au long du rayon pour le bois de trois principales espèces commerciales d'eucalyptus (*Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Corymbia (Eucalyptus) citriodora*) du Brésil. Les résultats ont montré que : (i) la température a un grand effet sur les propriétés physico-mécanique du bois ; (ii) les changement des propriétés sont plus importantes pour le bois plus dense ; (iii) le traitement avec l'air a un effet plus important sur le bois à 220 °C ; (iv) les espèces présentent différentes valeurs des proportion duramen/aubier/écorce entre elles et à différentes hauteurs ; (v) l'*E.grandis* et l'*E.saligna* présentent des parois fines et un grand diamètre de lumen et le *C.citriodora* le contraire ; (vi) il n'a pas été trouvé de relation entre la distance de prélèvement des échantillons par rapport à la moelle et les valeurs des retraits obtenues. Nous avons également étudié les différences intra et interspécifiques.

Mots-clés : propriétés physico-mécaniques/anatomiques ; DMA ; réтификаtion ; traitement thermique ; duramen, aubier, écorce, images microscopiques MEBE ; variation volumique ; *Eucalyptus grandis*; *Eucalyptus saligna*; *Corymbia (Eucalyptus) citriodora*