

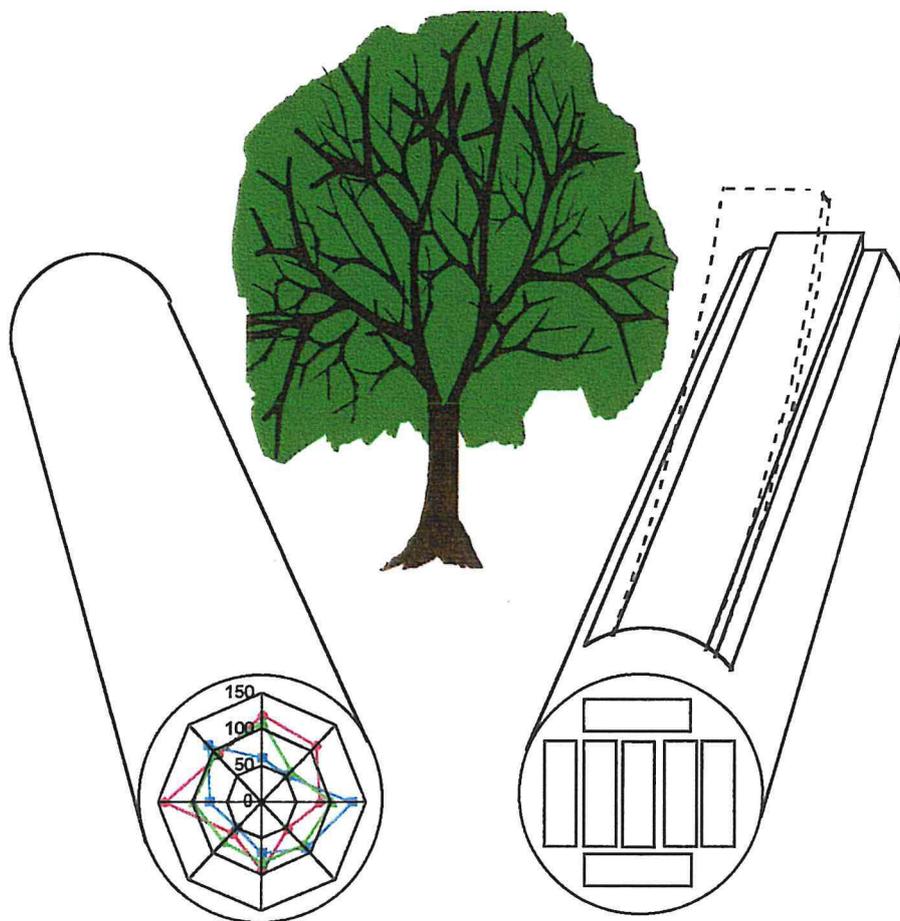
DK 300144
B7-TH271

18 FEV. 1999

Rapport de stage de fin d'étude

(Mars 97 à Juillet 97)

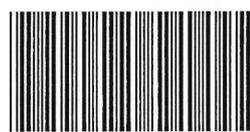
Thème: Analyse des déformations induites
par les contraintes de croissance
lors du sciage d'une grume



CIRAD-Forêt
Maison de la Technologie
73, rue J.F. Breton - BP 5035
34032 MONTPELLIER Cedex 01

CIRAD-Dist
UNITÉ BIBLIOTHÈQUE
Baillarguet

Christophe HARGOUES
E.S.B. 3
61^{ème} promotion
Année scolaire 1996/97



TH03062

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier M. Bernard THIBAUT pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire Qualité et Technologie des Bois du CIRAD-Forêt. Je remercie tout particulièrement mon maître de stage, Mme Meriem FOURNIER-DJIMBI pour son aide, sa disponibilité et ses conseils précieux tout au long du stage. J'associe à ses remerciements M. Gilles CALCHERA, M. Patrick CASSAN et M. Jean-Georges COMBES pour avoir facilité mon intégration et M. Jean Philippe COSTES pour sa collaboration dans le travail effectué.

Enfin, je remercie tout les membres du laboratoire Qualité et Technologie des Bois qui m'ont permis d'évoluer dans une excellente ambiance de travail et de convivialité.

Mots clefs

↳ Déformations de sciage
(flèche de face, flèche de rive, tuilage, gauchissement)

↳ Retrait longitudinal

↳ Contraintes de croissance

↳ Déformations Résiduelles Longitudinales de Maturation (DRLM)

↳ Eucalyptus

Key words

↳ Sawing warp
(bow, crook, cup, twist)

↳ Longitudinal shrinkage

↳ Growth stresses

↳ Longitudinal Residual Maturation Strain

↳ Eucalyptus

Sommaire

REMERCIEMENTS	1
MOTS CLEFS	2
KEY WORDS.....	2
SOMMAIRE.....	3
INTRODUCTION.....	5
PRESENTATION GENERALE DU CIRAD	6
I.1 QU'EST CE QUE LE «C.I.R.A.D».....	7
.2 LE DEPARTEMENT CIRAD FORET ET LE PROGRAMME «BOIS»	8
I.3 LA MAISON DE LA TECHNOLOGIE A MONTPELLIER.....	8
PRESENTATION DU SUJET	11
II.1 LE PROJET SiCroDEF.....	12
II.2 LES CONTRAINTES DE CROISSANCE ET LEURS CONSEQUENCES.....	13
<i>II.2.1 Rappel anatomique</i>	<i>13</i>
<i>II.2.2 Origine des contraintes de croissance.....</i>	<i>14</i>
<i>II.2.3 Mesure des déformations de maturation.....</i>	<i>14</i>
<i>II.2.4 Accumulation des contraintes dans le bois de l'arbre.....</i>	<i>15</i>
<i>II.2.5 Conséquences des contraintes de croissance à l'abattage et au sciage.....</i>	<i>17</i>
<i>II.2.6 Etat de la recherche.....</i>	<i>17</i>
II.3 IMPORTANCE DES PLANTATIONS D'EUCALYPTUS DANS LE MONDE.....	19
II.5 LES VARIATIONS INTRA-ARBRE DES PROPRIETES DU BOIS	20
PROTOCOLE D'ESSAIS EXPERIMENTAL.....	23
III.1 L'ESSENCE ETUDIEE.....	24
III.2 MESURE DES DEFORMATIONS RESIDUELLES LONGITUDINALES DE MATURATION.....	25
III.3 MESURE DE RETRAIT LONGITUDINAL ET DE LA COURBURE.....	25
<i>III.3.1 Mesure de retrait longitudinal.....</i>	<i>26</i>
<i>III.3.2 Mesure de la courbure.....</i>	<i>28</i>
III.4 MESURE DES DEFORMATIONS DE SCIAGE	28
III.4 MESURE DU MODULE D'ELASTICITE	32

RESULTATS ET ANALYSES	33
IV.1 LES DEFORMATIONS RESIDUELLES LONGITUDINALES DE MATURATIONS	34
IV.2 LE RETRAIT LONGITUDINAL.....	35
IV.3 LA COURBURE	36
IV.4 MESURE DES DEFORMATIONS DE SCIAGE SUR LA REGLE.....	39
<i>IV.4.1 La flèche de face.....</i>	<i>39</i>
<i>IV.4.2 La flèche de rive.....</i>	<i>39</i>
<i>IV.4.3 Le tuilage.....</i>	<i>40</i>
<i>IV.4.4 Le gauchissement.....</i>	<i>41</i>
<i>IV.4.5 La surépaisseur.....</i>	<i>42</i>
IV.5 MODULES D'ELASTICITES DES AVIVES.....	43
IV.6 RELATIONS ENTRE DRLM ET DEFORMATIONS DE SCIAGE	43
<i>IV.6.1 Passage des valeurs des DRLM aux contraintes de croissance.....</i>	<i>43</i>
<i>IV.6.2 Relation entre DRLM et déformations de sciage.....</i>	<i>44</i>
<i>IV.6.3 Modélisation des déformations.....</i>	<i>45</i>
CONCLUSION.....	48
BIBLIOGRAPHIE.....	49
ANNEXES	51

Introduction

L'eucalyptus est une essence qui suscite depuis quelques années toute l'attention du CIRAD Forêt. Réputé pour être une essence à croissance très rapide, il est utilisé en grande partie en tant que bois de chauffage et dans la papeterie. Servant essentiellement d'essence de reboisement, les plantations d'eucalyptus n'ont cessé d'augmenter de part le monde. Mais l'emploi de ce matériau dans des domaines aussi limités que le bois de feu a éveillé l'intérêt des chercheurs et des industriels pour essayer de découvrir d'autres applications à cet arbre à la croissance spectaculaire. Ils se sont trouvés très vite confrontés à un problème intrinsèquement lié à cette croissance rapide: les contraintes de croissance. Ces contraintes qui ont pour finalité d'établir l'équilibre mécanique de l'arbre, sont à l'origine de nombreuses difficultés rencontrées lors de la première et deuxième transformation. La libération de ces contraintes occasionne des fentes à l'abattage, des déformations des débits, des phénomènes de retrait important...Le projet SiCroDef sur lequel j'ai travaillé pendant cinq mois a pour objectif « L'analyse des déformations induites par les contraintes de croissance lors du sciage des grumes ». Etalé sur une période de trois ans, ce projet entre dans le cadre d'une convention liant quatre laboratoires dont le CIRAD-Forêt. Après une campagne de mesure qui a duré deux mois environ, je me suis attaché à l'analyse de cette banque de données riche de 4000 mesures. Ce rapport regroupe l'ensemble de mon travail pendant ces cinq mois. Après une présentation générale du CIRAD, une partie est consacrée à la présentation du sujet réunissant l'état de la recherche, les orientations des investigations...De cette étude découle un protocole d'essai qui a été effectué sur un clone d'eucalyptus. Dans la quatrième et dernière partie, je me suis employé à analyser l'ensemble des résultats.

Première Partie:

Présentation Générale du CIRAD

I.1 Qu'est ce que le «C.I.R.A.D»

Le centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, CIRAD, est un organisme scientifique français créé en juin 1984 à partir du regroupement d'instituts techniques plus anciens . Il participe activement au développement rural des pays tropicaux grâce à ses projets d'études et de recherches dans le secteur agricole ,agro-alimentaire et forestier. Le CIRAD est présent dans vingt-quatre autres pays répartis un peu partout dans le monde ,sous forme de centres de recherche ,de chercheurs en affectation ou simplement de coopération sous forme de mission . Actuellement en restructuration, le CIRAD comprenait en Avril 1997 sept départements de recherche:

- ♦ Cultures annuelles : (CIRAD-CA)
- ♦ Cultures pérennes : (CIRAD-CP)
- ♦ Elevage et médecine vétérinaire : (CIRAD-EMVT)
- ♦ Gestion ,recherche ,documentation et appui technique: (CIRAD-GERDAT)
- ♦ Production fruitière et horticoles : (CIRAD-FLHOR)
- ♦ Système agro-alimentaire et ruraux : (CIRAD-SAR)
- ♦ Forêt : (CIRAD-Forêt)

En interaction avec des projets de développement dans les régions tropicales, le centre de Montpellier met au point:

- ◆ Des méthodes pour l'analyse et l'innovation technique et socio-économiques tels que:
 - ♦ L'analyse du génome et de la diversité génétique.
 - ♦ La connaissance et l'amélioration des plantes, des arbres et des animaux.
 - ♦ La lutte intégrée contre les ravageurs, les parasites ,les virus.
 - ♦ La conception d'équipements agricoles et de procédés de transformation agro-alimentaire.
 - ♦ L'étude des relations entre les hommes, les cultures, les animaux et leur milieu.
 - ♦ L'analyse des stratégies paysannes et l'aménagement des territoires.
- ◆ Des techniques telles que:
 - ♦ La culture *in vitro* et la biologie moléculaire.
 - ♦ La modélisation et l'architecture des plantes.
 - ♦ La simulation des systèmes de culture.
 - ♦ La surveillance épidémiologique et la prévention sanitaire.
 - ♦ L'analyse chimique des produits et des aliments.
 - ♦ La floristique et l'identification botanique.
 - ♦ La préservation et la transformation du bois.
- ◆ Des outils et des produits pour les pays en développement tels que:
 - ♦ Des semences et des plants.
 - ♦ Des kits de diagnostics pour les maladies des plantes et des animaux.
 - ♦ Des vaccins vétérinaires.
 - ♦ Des prototypes de laboratoire.
 - ♦ Des équipements industriels et agricoles.
 - ♦ Des systèmes d'information géographique et des cartes.
 - ♦ Des logiciels d'aide à l'identification des parasites et des mauvaises herbes.
 - ♦ Des logiciels d'analyse et de traitement statistiques.
 - ♦ Des bases de données.

I.2 Le Département CIRAD Forêt et le programme «Valorisation des bois tropicaux»

Répondre aux besoins en bois des populations tout en sauvegardant la forêt est le principal objectif du CIRAD-Forêt. En liaison étroite avec les programmes «Forêt Naturelle», «Plantations», «Agroforesterie», du CIRAD-Forêt, le programme «Valorisation des bois tropicaux» mène des opérations de recherche, de formation et d'aide au développement concernant à la fois :

- ♦ l'analyse des propriétés de base du bois visant à mieux connaître la ressource forestière.
- ♦ l'étude des procédés et schémas de transformation adaptés à cette ressource dans le contexte socio-économique des régions considérées.

L'activité scientifique et technique des chercheurs du programme «Valorisation des bois tropicaux» est structurée en quatre grands projets.

- ♦ étude des facteurs qui déterminent la qualité du bois.
- ♦ étude des relations entre structure, propriétés et usages des bois des régions chaudes.
- ♦ amélioration de la qualité des produits à base de bois par différents procédés.
- ♦ l'optimisation des itinéraires technologiques et économiques de transformation et de mise en oeuvre des bois dans le contexte de telle ou telle région chaude.

Les différents laboratoires de rattachement des chercheurs du programme servent de support à des formations aussi bien pour des techniciens que pour des cadres dans l'initiation et l'apprentissage des technologies et du savoir faire. 30 personnes sont affectées au programme « Valorisation des bois tropicaux », dont 14 scientifiques.

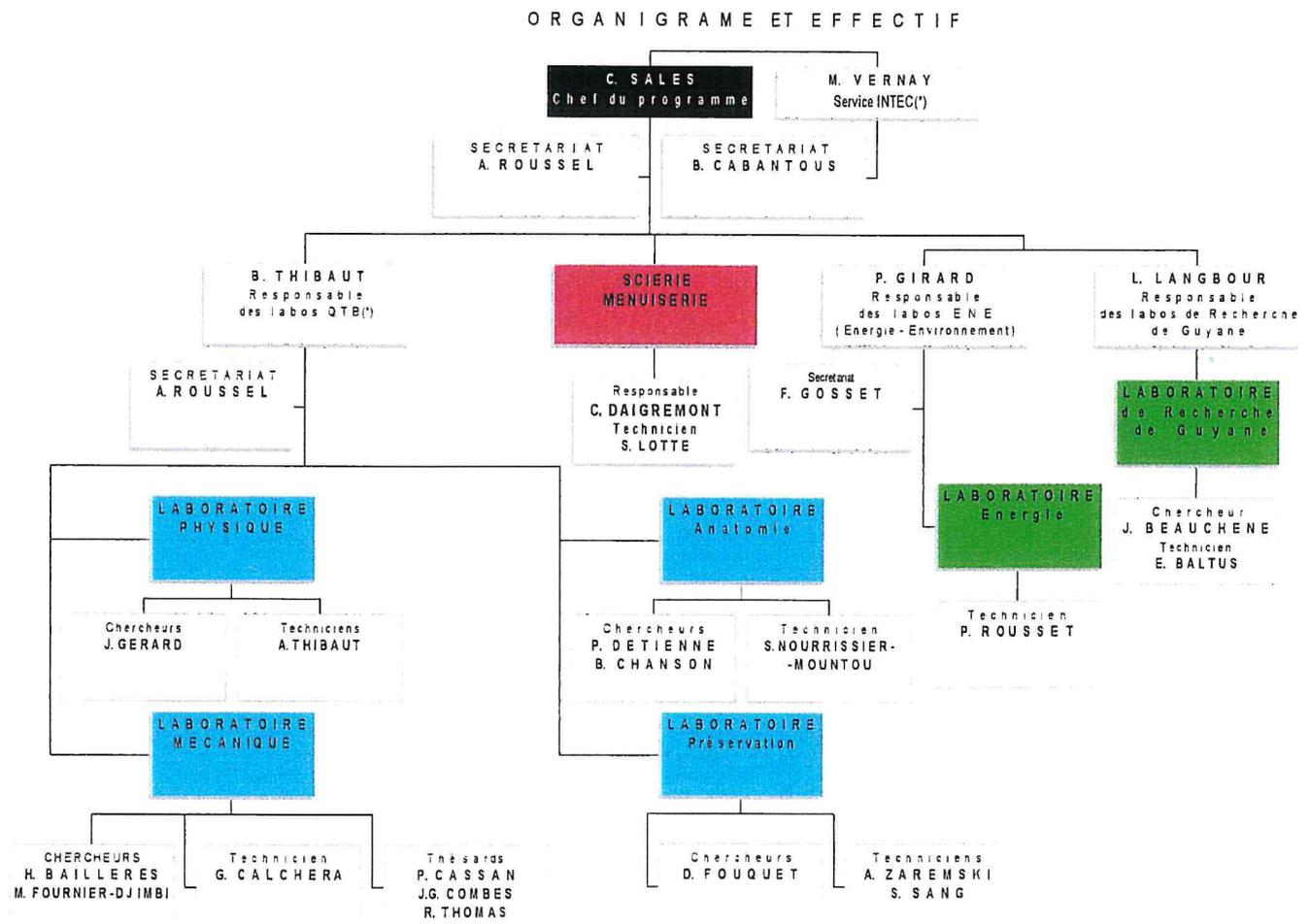
I.3 La Maison de la Technologie à Montpellier

Les installations du programme « Valorisation des bois tropicaux » à Montpellier sont concentrées sur un site regroupant les technologies de tous départements: la maison de la technologie.

Ces installations rassemblent sur un total de plus de 700 m² :

- ♦ Les collections de référence (plus de 8000 essences de bois différentes).
- ♦ Les chambres conditionnées en température et humidité.
- ♦ Les laboratoires d'anatomie et d'étude de la microstructure.
- ♦ Le laboratoire d'essais physiques.
- ♦ Le laboratoire d'essais mécaniques.
- ♦ Les cellules de culture de champignon et d'élevage de termites.
- ♦ Le laboratoire de durabilité et préservation du bois.
- ♦ Le laboratoire de carbonisation et de traitement thermique.
- ♦ Le laboratoire d'analyse des combustibles et des effluents résultants de la valorisation énergétique de la biomasse.

Le personnel attaché au programme "valorisation des produits forestiers" est constitué en plusieurs groupes de travaux comme illustré si dessous.



QTB(*): Qualité et Technologie des Bois

INTEC(*): Information Technique

L'activité traditionnelle de ce programme est de mesurer, de classer, de modéliser les propriétés physico-mécaniques des bois tropicaux pour rationaliser leur utilisation. Parallèlement, des outils de transformation adaptés (sciage, séchage...) sont développés. En effet une des principales originalités des bois tropicaux réside dans la grande diversité des essences et des caractéristiques technologiques. De ce fait, la connaissance de cette diversité, des relations qui lient les propriétés, et des lois de variations, sont indispensables pour optimiser l'adéquation qualité-emploi. Les comportements particuliers de certaines essences tropicales et les contraintes inhérentes à leurs utilisations régissent le choix des propriétés à analyser :

- ◆ Qualité des arbres(dimensions, forme...)
- ◆ Caractéristiques anatomiques
- ◆ Propriétés physiques (densité, retrait) et mécaniques (bois sans défaut...)
- ◆ Propriétés chimiques et thermochimiques.
- ◆ Durabilité naturelle et imprégnabilité
- ◆ Aptitude au séchage

C'est ainsi que 4000 séries d'essais physiques et mécaniques ont permis de caractériser près de 1100 essences tropicales. Actuellement, le programme «Bois» est de plus en plus sollicité pour la caractérisation des bois de plantations à croissance rapide. Les plantations forestières ou agroforestières, publiques ou privées (industrielles et paysannes), même si elles

représentent encore une faible part du marché mondial des bois tropicaux, semblent pour l'avenir devoir prendre dans de nombreux pays le relais des forêt naturelles appauvries par l'exploitation extensive.

Le problème n'est alors plus de gérer une grande diversité d'essences car le nombre d'espèces plantées à grande échelle dans un même site est assez faible: Eucalyptus (une grande quantité de variétés sélectionnées à partir d'espèces pures ou d'hybrides), Pins tropicaux, Teck...

A la diversité des espèces, se substitue l'hétérogénéité à l'intérieur du même arbre (problème liés au bois juvénile, au bois de réaction...). Enfin la connaissance de l'impact des pratiques d'amélioration génétique et de sylviculture sur l'aptitude à l'emploi des bois est essentielle pour rentabiliser ces opérations. En particulier, une valorisation en bois d'oeuvre d'une part de ces plantation souvent à l'objectif principal papetier ou bois d'énergie semble essentielle pour assurer une marge bénéficiaire suffisante aux producteurs.

Deuxième partie

Présentation du sujet

«Analyse des déformations induites par les contraintes de croissance lors du sciage des grumes»

II.1 Le projet SiCroDef

Le sujet qu'il m'a été demandé d'étudier entre dans le cadre du projet SiCroDef (Simulation des contraintes de croissance et de leurs conséquences sur la déformation des sciages). Ce projet entre dans le cadre d'une convention liant quatre laboratoires sur un financement du Ministère de l'Agriculture (Direction de l'Espace Rural et de la Forêt) et de l'ADEME. Ces quatre laboratoires sont:

- ♦ le CIRAD Forêt
- ♦ le L.R.B.B. : Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux
- ♦ le CIRAD-MEB (Modélisation des Entités Biologiques)
- ♦ l'ERQB de l'INRA de Nancy: Equipe de Recherches sur la Qualité des Bois

L'objectif de ce projet est de mettre en place un outil liant les différents modules de simulations. Les travaux seront orientés selon deux axes préférentiels:

- en amont sur la sylviculture: les retombées auront pour but de mieux déterminer la variabilité (c'est à dire les effets des facteurs intrinsèques de l'espèce et des facteurs externes liés au milieu) de chaque essence.
- en aval le meilleur traitement de la grume et son optimisation lors de la première transformation du bois.

Ce projet s'étale sur une période de trois ans. La première période du programme dure deux ans et comporte les étapes suivantes:

- Bilan détaillé de l'état actuel des modules et définition des paramètres de simulation manquants.
- Réalisation des développements dans chaque module afin de préparer l'interconnexion.
- Formatage des fichiers de données selon une structure commune aux différents modules.
- Fourniture des paramètres de simulation définis plus haut (bibliographie, mesures de calage...)

La seconde étape est plus concrète et dure une année. Elle consiste à réaliser les liens et interfaces entre modules de calcul et à valider expérimentalement les modélisations. Mon travail sur l'analyse des contraintes de croissance et de leurs influences sur les déformations des sciages s'inscrit dans cette partie. La campagne de mesure que je dois effectuer se décompose en trois étapes. En périphérie des billes, plusieurs mesures de DRLM (Déformations Résiduelles Longitudinales de Maturation) sont pratiquées en utilisant la méthode du trou unique (Voir partie Contrainte de croissance). Les billons sont ensuite débités selon deux modes de débit. Des mesures de déformations sont effectuées avant et après sciage à l'aide d'un extensomètre ainsi que les mesures de courbure. Après délignage, différentes déformations (tuilage, gauchissement, flèches de face et de chant), sont mesurées sur les avivés produits, de section 120x20 millimètres et de longueur 2,50 mètres. Les détails du protocole seront développés ultérieurement.

II.2 Les contraintes de croissance et leurs conséquences

II.2.1 Rappel anatomique

Le bois est un ensemble de tissus secondaire, à parois lignifiées, résultant du fonctionnement, vers l'intérieur, de l'assise génératrice cambiale libéro-ligneuse (R. KELLER, « Le Bois, matériau d'ingénierie », 1994). Il remplit dans l'arbre des fonctions bien déterminées:

- *fonction de conduction* de la sève brute ascendante allant de la racine de l'arbre jusqu'à la cime (vaisseau).
- *fonction de soutien* (trachéide, fibre)
- *fonction de stockage*, de restitution, d'élaboration et de transformation chimique des substances (parenchyme).

Ces tissus sont constitués de cellules issues par divisions de l'assise génératrice libéro-ligneuse qui se disposent spatialement selon un plan d'organisation spécifique: *le plan ligneux*. Les arbres possèdent des tissus embryonnaires assurant la croissance et le développement. Ces tissus méristématiques forment l'apex caulinaire et racinaire dont la fonction est d'assurer la croissance en longueur de l'ensemble du système végétal et la mise en place de l'architecture propre de l'arbre. L'extension dans le plan tangentiel du procambium conduit à la formation du cambium (ou méristème secondaire) qui différencie les tissus vasculaires secondaires que sont le xylème (conducteur de sève brute) et le phloème (conducteur de sève élaborée). Cette deuxième phase peut s'apparenter à une augmentation du volume des axes pérennes mis en place dans la première étape.

Le cambium est formé de cellules initiales radiales et de cellules initiales fusiformes. La différenciation de ces cellules est à l'origine de toutes les cellules ligneuses (Vaisseaux, parenchyme, fibres...). L'assise cambiale est caractérisée par sa faculté à se diviser indéfiniment pour former les cellules des zones cambiales à l'origine des nouvelles cellules de liber et de bois. Les cellules des zones cambiales sont capables de se diviser un certain nombre de fois pour donner les cellules filles qui se différencient en divers types de cellules libériennes ou ligneuses.

La cellule ligneuse complètement différenciée présente, de l'extérieur vers l'intérieur, une couche intercellulaire, une paroi primaire et une couche secondaire. Cette paroi secondaire est elle-même divisée en trois couches. La première couche externe S1 est composée de microfibrilles de cellulose dont les angles d'orientation varient de 60 à 80° par rapport à l'axe de la cellule. Une couche centrale S2 composée d'une organisation dense de microfibrilles vient s'ajouter; l'angle des microfibrilles ne varie plus que de 5 à 30°. L'épaisseur de cette couche représente jusqu'à 85% de l'épaisseur totale de la membrane cellulaire. L'orientation de la matière dans S2 et l'importance de cette couche sont largement responsables du comportement physique de la paroi de la cellule ligneuse. Enfin, une couche interne S3 appelée aussi couche tertiaire est constituée de microfibrilles dont l'angle avec l'axe de la cellule varie de 60 à 90°. Au cours de la formation de la paroi secondaire et de sa lignification se différencient, des zones de communication entre cellules appelées ponctuations et qui sont des zones d'interruption de la paroi secondaire.

II.2.2 Origine des contraintes de croissance

Tout au long de sa croissance, la structure du bois subit des transformations et des efforts. Il existe deux catégories de contraintes: les contraintes liés au poids propre de l'arbre et les contraintes internes de croissance qui résultent de la transformation physico-chimique des parois cellulaires.

En effet, les contraintes de croissance dites aussi contraintes de maturation apparaissent pendant la formation de la paroi secondaire des cellules (W.E. HILLIS; A.G. BROWN; 1978). La lignine est synthétisée dans la paroi cellulaire entre les microfibrilles. Ainsi les fibres ou trachéïdes tendent à se dilater dans le plan tangentiel et à se contracter dans le sens longitudinal du fait d'un gonflement de la matrice de lignines et d'hémicelluloses et vraisemblablement d'un retrait des chaînes de cellulose cristalline. Ces déformations de maturation apparaissent pendant le processus de lignification du xylème. Elles se développent en fait lorsque le bois est en fin de différenciation.

Le bois de réaction ou de tension chez les Angiospermes est connu pour être le siège de contraintes périphériques de tension plus importantes que dans le bois normal. Il se caractérise donc par un fort retrait de maturation (DRLM). De plus, le bois de tension est anatomiquement différent du bois normal.

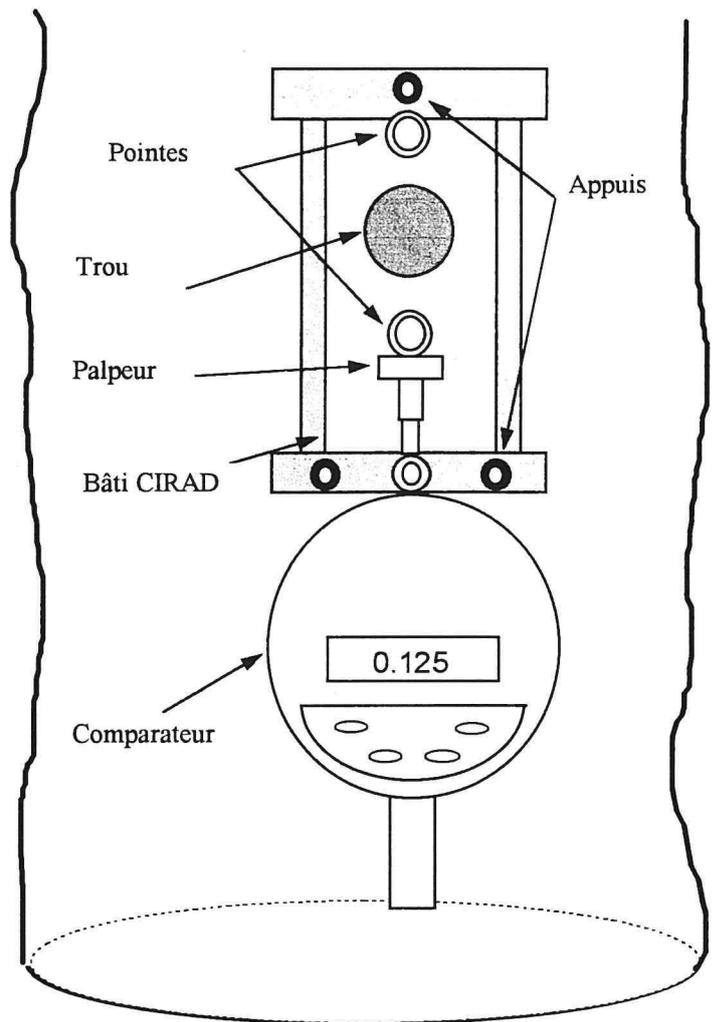
Chez les Angiospermes, le bois de tension est habituellement caractérisé par la présence de fibres où la partie la plus interne de la paroi, presque exclusivement composée de cellulose cristalline, a un aspect gélatineux d'où la dénomination de «fibre G» (BAILLERES, CHANSON, FOURNIER, dans le Rapport ASMA, 1993). L'angle des microfibrilles par rapport à l'axe de la fibre est très faible dans la couche G. La présence de cette couche est habituellement un marqueur anatomique spécifique du bois de tension.

Cependant, cette couche G n'est pas toujours présente chez les Angiospermes et en particulier chez les Eucalyptus. En l'absence de cette couche gélatineuse, on remarque que l'angle des microfibrilles de celluloses reste toujours assez faible. Pour essayer de caractériser plus précisément le bois de tension, des études ont été faites pour évaluer le taux de lignine dans ces zones tendues (BAILLERES, 1994). Les résultats ont montré que la teneur en lignine de Klason est en moyenne moins importante dans les zones à fort retrait de maturation. On observe aussi un changement de forme des cellules. L'épaisseur des parois où se localise le bois tendu est en moyenne plus importante que dans le bois normal.

II.2.3 Mesure des déformations de maturation

La mesure des Déformations Résiduelles Longitudinales de Maturation (DRLM) utilisée est basée sur la modification locale du champs de croissance dans le plan LT. Cette méthode est dite du trou unique. Elle s'inspire de techniques classiques de mesures des auto-contraintes dans les matériaux (notamment les plaques métalliques ou composites). Elle utilise un capteur mis au point au Centre Technique Forestier Tropical (actuellement CIRAD Forêt).

Le principe décrit par ARCHER en 1986 consiste à mesurer la variation de la distance entre deux pointes, dû au perçage un trou central de 20 mm. On procède tout d'abord à l'écorçage de l'arbre à une hauteur de 1,30 mètre afin de faire apparaître le cambium. Après avoir planté les deux pointes de référence distantes de 45 mm sur une profondeur de 10 mm, on installe le bâti qui repose à l'aide de trois appuis sur l'arbre écorcé. Ce bâti se compose d'un châssis muni d'un comparateur type Mitutoyo d'une précision du micron. Le palpeur du comparateur appuie sur l'une des deux pointes tandis que le châssis repose sur l'autre pointe. Deux sangles élastiques permettent de plaquer le bâti sur l'arbre. On effectue ensuite un trou de 20 mm de diamètre entre les deux pointes et l'on observe un déplacement positif ou négatif selon le cas où l'on a affaire à du bois tendu ou comprimé. On arrête de percer lorsque la valeur indiquée par le comparateur s'est stabilisée. Pour obtenir une distance précise entre les deux pointes, on utilise un guide.

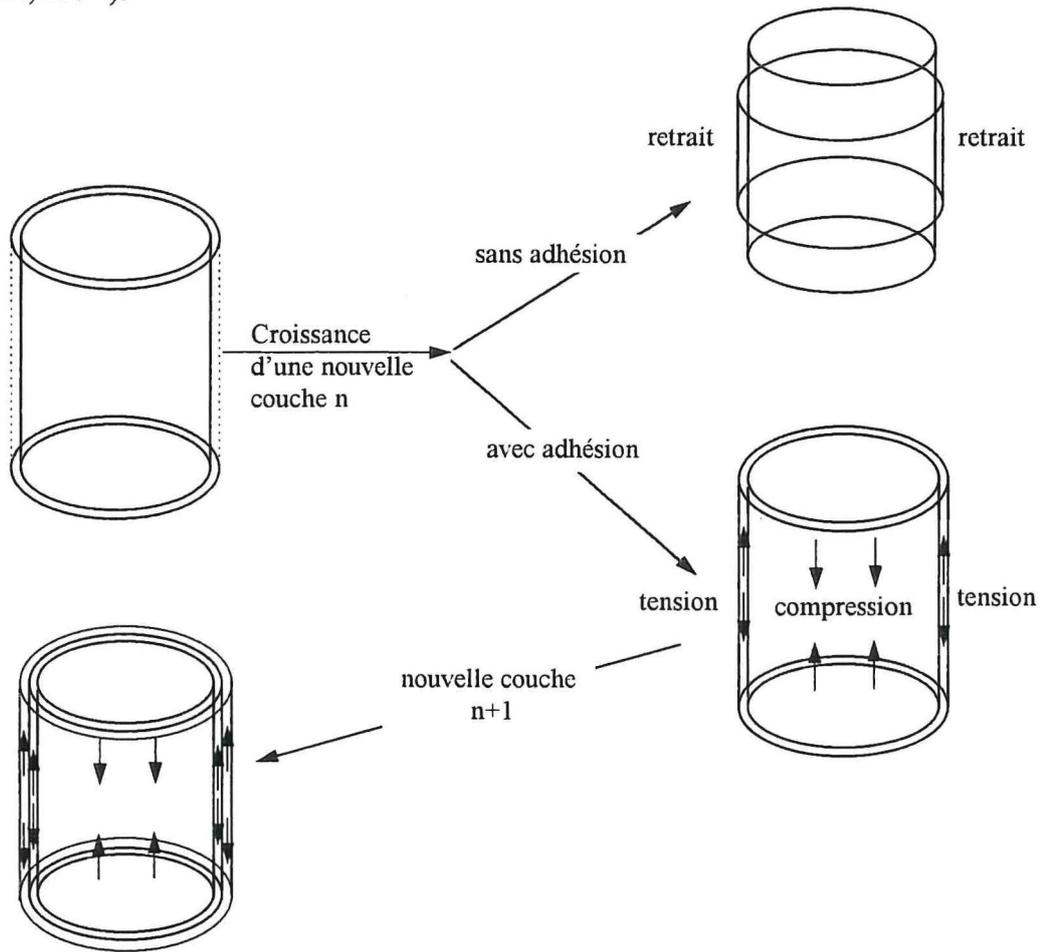


II.2.4 Accumulation des contraintes dans le bois de l'arbre

Nous avons dit auparavant que les déformations de maturation apparaissent lors de la différenciation des cellules du bois. Les contraintes sont donc générées dans la zone cambiale. Pour expliquer les contraintes de croissance et leurs conséquences sur l'équilibre mécanique de l'arbre, il est préférable de raisonner sur une couche élémentaire de bois qui vient d'être formée par le cambium.

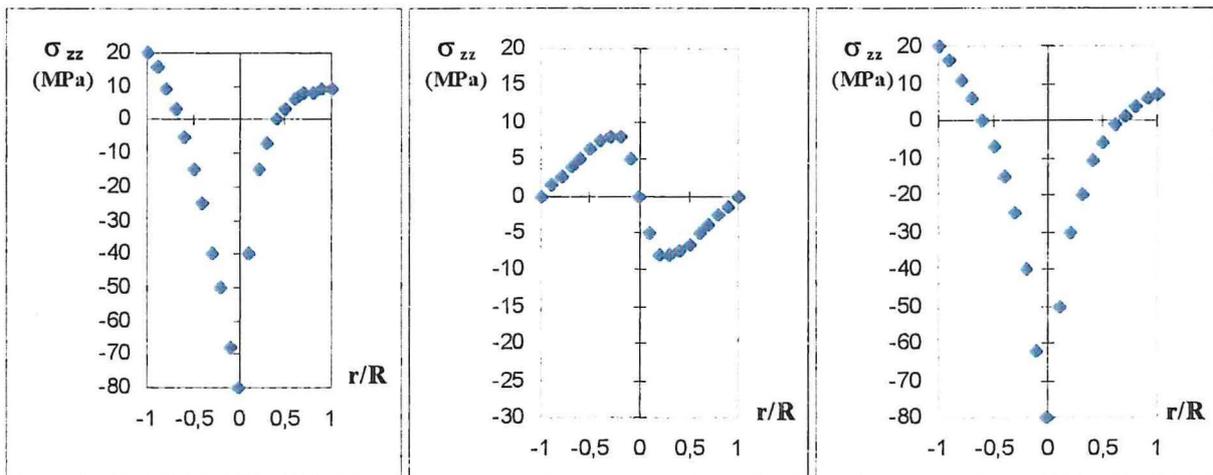
La différenciation cellulaire qui se déroule dans la zone cambiale modifie constamment le champ de contraintes de l'arbre. La formation de la membrane secondaire des cellules ne peut pas se développer librement dans le plan TL. Par conséquent, lors de l'adhésion des nouvelles cellules à la couche de cellules précédemment formées, on observe une contraction longitudinale et une expansion tangentielle qui induisent une tension longitudinale et une compression tangentielle. L'itération de ce phénomène conduit à l'apparition d'un champ de contrainte.

Le processus d'accumulation des contraintes peut s'illustrer de la manière suivante (BAILLERES, 1994).



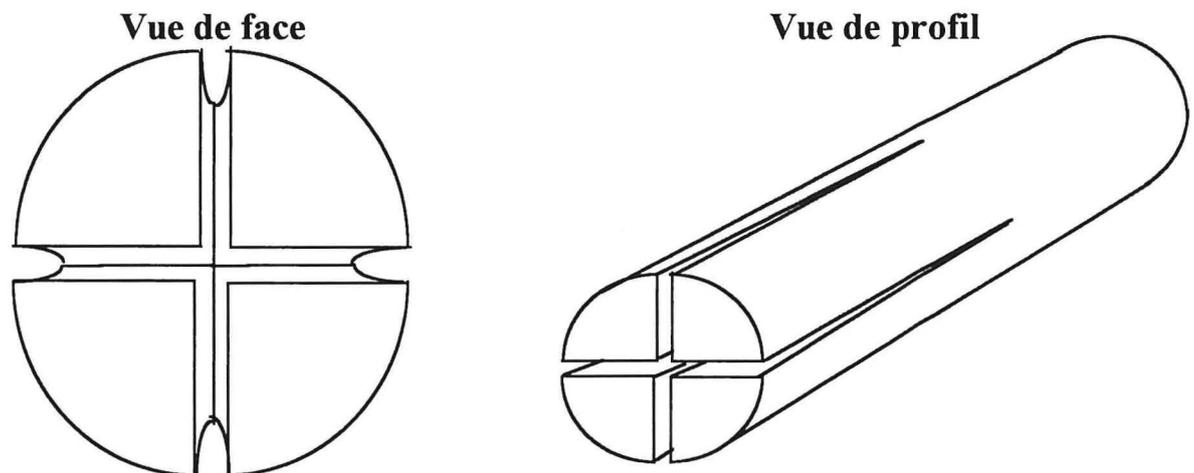
Du point de vue mécanique, ce principe d'accumulation des contraintes conduit à une variation de l'état de contrainte de l'arbre en fonction du rayon. En périphérie de l'arbre se situent les contraintes dites de maturation. Ce sont ces forces que l'on mesure avec le capteur CIRAD. Mais l'arbre est soumis à d'autres contraintes comme son propre poids. Les contraintes de croissance résultent de la superposition du champs de contraintes de maturation et des contraintes de support (FOURNIER, 1989).

$$\text{Contraintes de maturation} + \text{Contraintes de support} = \text{Contraintes de croissance}$$



II.2.5 Conséquences des contraintes de croissance à l'abattage et au sciage

Depuis plusieurs décennies, des recherches sont effectuées sur les contraintes de croissance. Ces forces qui entrent en jeu peuvent être plusieurs fois supérieures au poids propre de l'arbre. Les conséquences premières des contraintes de croissance sont l'éclatement des grumes, les fentes dans le bois de coeur, les déformations des sciages. Plusieurs études ont été faites sur les arbres à fortes contraintes de croissance et sur les méthodes à employer à l'abattage pour éviter leurs inconvénients. En effet certaines essences tropicales comme le WAPA en Guyane nécessite la mise en place d'un dispositif anti-éclatement sur l'arbre avant abattage pour éviter tout accident. D'autres études ont essayé de faire le parallèle entre une modélisation des contraintes en périphérie de l'arbre et les déformations dues à la libération de ces mêmes contraintes. L'étude avait été faite sur des eucalyptus; le mode de sciage restait simple puisqu'il consistait à découper partiellement une grume en quatre quartiers et à mesurer l'écartement entre les quatre quartiers (J. GERARD, Thèse de Doctorat, 1994)



Ces travaux ont permis de mettre en évidence la relation étroite qu'il y a entre les contraintes de maturation et les déformations de sciage. Outre les fentes d'abattage, les contraintes de croissance ont une incidence sur la qualité des sciages. Elles sont à l'origine des déformations traditionnellement rencontrées (flèche de face, la flèche de rive, le tuilage et le gauchissement) lors du sciage des grumes. Les déformations induites par la libération des contraintes de croissance diminuent le rendement matière, augmentent les coûts de production et favorisent l'usure prématurée des outils de coupe. En effet, il arrive que la pièce de bois, pourtant solidement maintenue, puisse bouger pendant le sciage. La déviation de lame par rapport à son plan de coupe implique bien souvent une dégradation précoce des dents de la scie.

II.2.6 Etat de la recherche

Actuellement, les travaux de recherches s'orientent selon deux axes distincts. Le premier tend à classer les arbres suivant leur utilisation dans la seconde transformation. Ce classement est basé sur l'état de contrainte de l'arbre avant abattage. Le niveau de contrainte est évalué par des capteurs fonctionnant sur le principe de la libération en périphérie des contraintes de croissance, ou par des indicateurs indirects: sols, sylvicultures, génotype, morphologies (fût penché, arbre assymétrique).

La méthode du trou unique utilisée lors de cette étude est un des moyens pour obtenir un état de contrainte de l'arbre. La méthode des deux rainures est une autre technique basée sur la mesure de la déformation longitudinale résultant du sciage manuel (après écorçage) de deux rainures de part et d'autre des pointes d'un capteur extensométrique. Ce capteur est muni de deux pointes (l'une fixe et l'autre mobile) disposées perpendiculairement aux deux rainures. La déformation longitudinale est donnée par la variation de la distance entre les deux pointes. Ces méthodes d'estimation de l'état de contraintes de l'arbre permettent de prévoir partiellement les utilisations ultérieures de la grume.

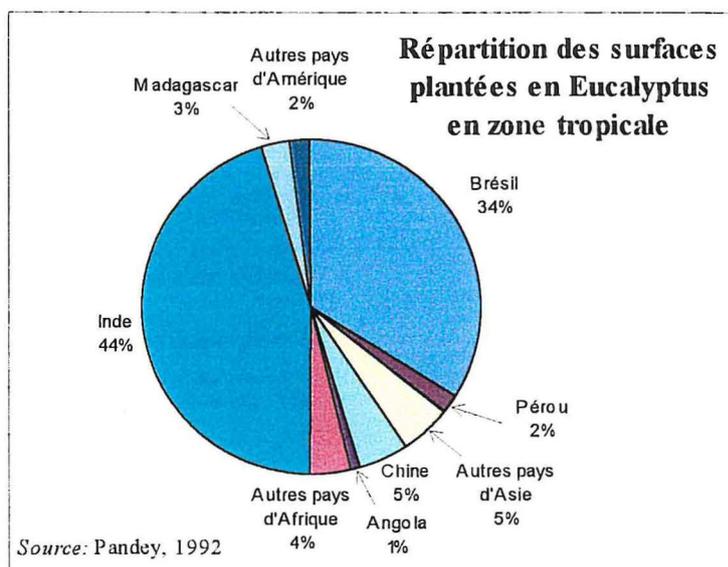
L'autre axe développé par la recherche est la détermination des méthodes de transformation des grumes pour limiter au maximum l'influence des contraintes de croissance sur l'abattage et les déformations de sciage. Pour diminuer les fentes d'abattage et l'éclatement, on procède au ceinturage de l'arbre par une ou plusieurs sangles en nylon en fonction du niveau présumé de contraintes. Après abattage, on dispose sur la grume un produit antifente ainsi que des connecteurs type «gang-nail». Ces connecteurs sont des plaques métalliques munie d'un grand nombre de pointes; ils sont placés sur les coupes transversales des grumes. Ce sont actuellement les seuls moyens existants pour limiter la formation de ces fentes.

Des travaux se sont intéressés plus particulièrement à la seconde transformation et à l'incidence du mode de débit sur les déformations de sciage. BEDEL J. et THIEL J. (Ouvrage GERDAT-CTFT, 1972) se sont penchés sur les relations qui pourraient exister entre les modes de débit et l'apparition de fentes sur les pièces de bois. Pour cela, ils ont comparé quatre modes de débits (débit en quartiers, débit en plot, débit en plots après débits des quatre dosses, débit en madriers après débit des quatre dosses) en prenant comme variable un indice de fente et un rendement parquet. Les résultats de cette étude sont assez limités en raison du choix des variables. Cependant, il ressort que le débit en plot est le plus défavorable. Une autre étude à plus grande échelle dirigée par H. HALLOCK (Forest Products Laboratory Madison, 1965) s'est intéressée aux déformations traditionnelles des avivés (flèches de face, de rive,...). Ici aussi, on a procédé au sciage de grume de pin selon quatre débits. Les conclusions de cette étude tendent à montrer la diminution des déformations lorsqu'on se rapproche du centre de la grume. L'emplacement de l'avivé dans la grume influe le niveau de déformation ultérieur.

Concernant le séchage et les déformations induites par ce séchage, des travaux ont été entrepris pour déterminer les distributions tridimensionnelles des propriétés physiques du bois (retrait, orientation du fil, densité...) et mettre en parallèle les champs d'eau libres dans l'arbre (GUILLEY, 1996). Par ailleurs, une méthode dite SDR (Saw, Dry, Rip) a été élaborée pour limiter les déformations dues au séchage. Cette application consiste à débiter la grume en plots, à les sécher, et ensuite à déligner les pièces de bois à une largeur désirée (R.R. MAEGLIN, R.S. BOONE, 1986). On obtient par cette méthode une bonne réduction de la flèche de rive et une diminution satisfaisante de la flèche de face et du gauchissement. Ce bref état de la connaissance ne contient pas la totalité des travaux traitant des contraintes de croissance et de leurs conséquences mais on y retrouve les grandes orientations prises par la recherche.

II.3 Importance des plantations d'Eucalyptus dans le monde

On estime à 13 millions hectares la surface de boisement d'eucalyptus dans le monde. Sur ces 13 millions, 10 millions d'hectares se trouvent en zone tropicale et subtropicale. Dans ces zones, les Eucalyptus constituent la principale essence utilisée pour les boisements et les reboisements du fait de leur rapidité de croissance (accroissement naturel 100 m³/ha/an), des possibilités d'amélioration végétale, de leur faculté d'adaptation au milieu et de leurs nombreuses utilisations potentielles.



De nos jours, plus de 50% des plantations tropicales se situent sur le continent asiatique ou sud-américains; 50% de ces peuplements ont moins de 10 ans (PANDEY, 1992). Les pays les plus plantés sont l'Inde (4.8 millions d'ha), le Brésil (3.6 millions d'ha); la Chine (0.5 million d'ha), le Portugal (0.4 million d'ha), l'Espagne (0.4 million d'ha) et l'Afrique du Sud (0.5 million d'ha).

Depuis les années 70, on assiste à des campagnes de reboisement où l'essence la plus utilisée est l'Eucalyptus. L'accélération du processus est directement liée à la demande croissante en bois d'industrie et en bois-énergie provoquée par la nécessité de développer les économies régionales et de faire face aux exigences d'une démographie galopante. La surface plantée en Eucalyptus en zone tropicale devrait atteindre les 12 à 14 millions d'hectares pour l'an 2000. En Europe, l'Eucalyptus ne peut se développer correctement que dans les régions suffisamment chaudes; en effet cette essence ne résiste que difficilement au froid et au gel. C'est pourquoi les chercheurs travaillent en permanence sur l'amélioration des clones d'Eucalyptus. Grâce à leurs études, certaines espèces comme l'*E. gunni* ou l'*E. dalrympleana* peuvent résister pendant quelques jours à des températures inférieures à zéro. On dénombre environ 600 essences différentes d'Eucalyptus (toutes originaires d'Australie), mais il est virtuellement impossible d'inventorier le nombre exact de clones et d'hybrides de ce genre.

II.4 Les utilisations des Eucalyptus

A l'origine, le bois d'Eucalyptus était principalement destiné au bois de chauffage et un peu à la conception de structures en bois. Puis le développement des travaux de recherche effectués notamment en Australie a permis d'élargir les domaines d'utilisations de l'Eucalyptus. On trouve maintenant de l'Eucalyptus dans des produits à haute valeur ajoutée comme l'ameublement, les placages, les poutres lamellé-collé... Mais les principales applications de l'Eucalyptus restent la production de combustible, et la fabrication de pâte à papier. Ces deux débouchés représentent 85% des emplois de cette essence. 10% des Eucalyptus est utilisé sous forme de bois d'industrie et seulement 5% des grumes sont affectées à la production de bois d'oeuvre. Cette faible utilisation s'explique par les problèmes techniques rencontrés lors de la première et de la seconde transformation. Ces problèmes sont liés à la grande variabilité intra-arbre de cette essence, à la forte concentration de contraintes de croissance mais aussi au faible diamètre des bois plantés. Nous avons vu que lors de l'abattage et du sciage, la libération des contraintes de croissance entraînait l'apparition de fentes en bout des grumes et des déformations transversales et longitudinales des avivés. Le séchage n'arrange pas les choses puisqu'il contribue à l'augmentation du retrait et favorise l'apparition de collapse.

Dans une moindre mesure et de façon plus ou moins marquée selon les espèces, d'autres facteurs participent à rendre problématique l'utilisation du bois d'eucalyptus sous forme massive ou de placage:

- ♦ la durabilité naturelle de certaines espèces est insuffisante; couplée à une mauvaise imprégnabilité, elle interdit toute possibilité d'utilisation des bois en extérieur.
- ♦ les trois principales catégories de défauts de fil dans le bois (fil tors, fil ondulé, contre-fil) se retrouvent chez la plupart des Eucalyptus. En plus de l'augmentation des déformations de sciage, ces défauts diminuent la résistance mécanique et nuisent à la bonne qualité des placages.
- ♦ les poches de résine appelées poches de Kino provoquent un encrassement des lames et diminuent les rendements matière

II.5 Les variations intra-arbre des propriétés du bois

Dans la partie précédente, nous avons vu que les phénomènes de fendage et de déformations étaient dus en grande partie au fait que le bois est un matériau hétérogène et anisotrope. La différenciation des cellules influence les caractéristiques du bois produit. Il existe donc des modifications quantitatives de la structure du bois (bois adulte, bois juvénile), de l'évolution physiologique du bois (aubier, duramen, propriété physico-chimiques du bois), de la morphologie des arbres (valeur des contraintes internes, bois de réaction...). Ces facteurs varient bien évidemment en fonction des essences et en fonction de l'environnement. La formation du bois peut se résumer en un processus regroupant la division des initiales cambiales suivie de la différenciation des différents types cellulaires. Il se produit d'abord une extension de la paroi primaire, contrôlée par la pression de turgescence. Ensuite survient l'épaississement de la paroi qui correspond à la formation de la paroi secondaire.

Une fois que l'épaississement s'est produit, la croissance longitudinale de la cellule n'est plus possible. L'épaississement se produit par assemblage tridimensionnel de microfibrilles de cellulose, et d'hémicelluloses, suivi de la lignification (Roland et Robert, 1989). A l'exception des parenchymes, tous les types de cellules meurent immédiatement après la lignification. Ce processus de formation du bois est sujet à des modifications qualitatives et quantitatives qui vont conduire à des variations spatiales des propriétés du bois dans l'arbre. L'observation montre que ces variations spatiales peuvent se structurer ainsi:

- des variations radiales.

Celles-ci peuvent être lentes et traduire l'effet du passage du bois juvénile au bois adulte (Le terme de bois juvénile décrit le bois formé pendant les premières années du fonctionnement cambial de chaque unité de croissance, même si celle-ci est formée par un individu adulte). La transition du bois juvénile au bois adulte est le phénomène qui affecte le plus la qualité technologique des bois de plantations.

D'autres variations plus rapides se superposent et traduisent l'effet de la structure interne du cerne. En effet, sur un certain nombre d'espèces, le bois formé au début de la saison de croissance (bois initial) a des caractéristiques différentes de celles du bois formé en fin de saison (bois final). Chez les feuillus, ce phénomène est surtout caractéristique des bois à zone initiale poreuse. Le bois initial est moins dense du fait de la présence de gros vaisseaux. Macroscopiquement, la proportion de ces deux bois (caractérisée par la texture) peut varier entre les cerne;

- des variations circonférentielles.

Au même instant, le cambium différencie fréquemment dans un secteur angulaire un bois particulier appelé bois de réaction. Chez les feuillus, ce bois est appelé bois de tension et diffère du bois "normal" essentiellement par ses fibres: celles-ci sont plus nombreuses, leur diamètre est souvent plus faible, leur longueur plus grande, leur paroi plus épaisse avec un contour un peu plus arrondi. Chez environ 50% des espèces, la modification la plus caractéristique est le développement d'une couche gélatineuse (couche G), formée de microfibrilles de cellulose faiblement inclinées (environ 5°) par rapport à l'axe de la cellule. Chez les autres espèces, il n'y a pas formation d'une couche G typique, mais seulement un manque général de lignification. Le bois de tension est souvent (mais pas toujours) plus dense; il présente un retrait longitudinal plus grand que le bois normal.

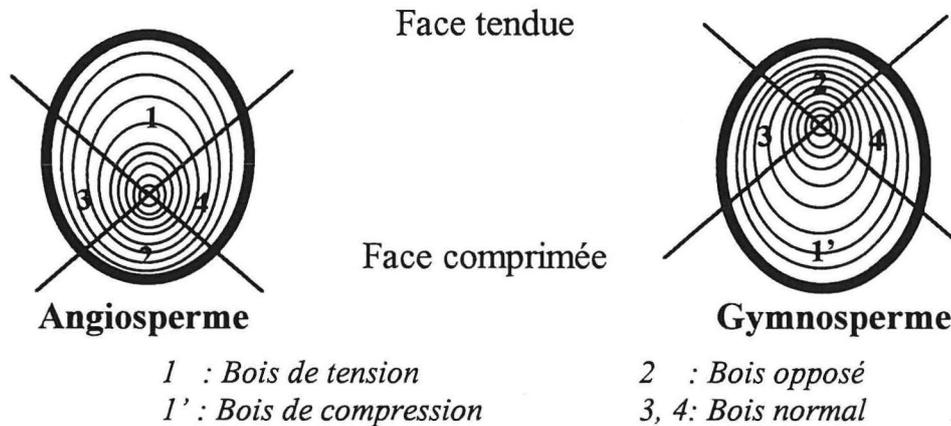
- des variations sur la hauteur.

Celles-ci sont généralement moins systématiques que les précédentes.

Ces variations spatiales sont sous l'influence de différents facteurs, entre autres:

- la vitesse de croissance. Celle-ci influe sur la structure interne du cerne. Chez les feuillus à zone initiale poreuse, l'augmentation de la largeur de cerne se traduit par une augmentation de la largeur du bois final, et donc par une densité moyenne plus grande. Cependant, ni la densité du bois initial, ni celle du bois final, ni la largeur du bois initial ne sont affectées notablement par la largeur de cerne. Chez les autres feuillus, l'effet de la largeur de cerne sur la densité du bois semble peu important. D'autre part, une activité cambiale intense se traduit par une diminution de la longueur des fibres. En particulier, les fibres sont plus courtes dans le bois initial que dans le bois final. La vitesse de croissance est influencée par le milieu, le génotype, la sylviculture.

- les réorientations (tropismes) des axes qui se courbent activement sous l'effet de facteurs externes (inclinaison accidentelle par rapport à la gravité, lumière asymétrique ...) voire internes (contrôle de l'angle branche-tronc, et dominance apicale). Chez les angiospermes, ces courbures se produisent grâce à la formation de bois de tension. En effet, à la fin de sa différenciation, ce bois tend à se rétracter plus que le bois normal diamétralement opposé. Il s'ensuit une tension longitudinale plus forte: le secteur de bois de tension tire vers lui le reste de l'axe. Ceci provoque donc une courbure opposée à l'action de la gravité, lorsque le bois de tension est formé sur la face supérieure de la tige inclinée (FOURNIER et al, 1994); chez les gymnospermes, les courbures sont dues à la formation du bois de compression.



- le vieillissement du cambium. Le passage sur le rayon du bois juvénile au bois adulte est typiquement un effet temporel. Raisonner en âge permet de considérer simultanément variations radiales et variations sur la hauteur. Ce vieillissement est un phénomène morphogénétique interne à l'arbre, éventuellement influencé par les conditions extérieures.

Les variations précédentes résultant de modifications du fonctionnement cambial sont présentes dès la formation du bois et irréversibles. La duraminisation est un autre phénomène qui provoque également des variations de propriétés du bois. C'est un processus au cours duquel le bois interne se transforme progressivement en bois parfait, qui ne contient plus de parenchymes vivants et dans lequel les matières de réserve (par exemple l'amidon) ont disparu ou ont été transformées en substances de bois parfait (IAWA, 1964). La progression centrifuge de la duraminisation dans le tronc s'accompagne d'une augmentation de la charge en extrait. De ce fait, la densité du bois augmente et le rendement en fibre diminue au fur et à mesure du vieillissement de l'arbre. C'est pourquoi il ne faut pas confondre les différents phénomènes de vieillissement: vieillissement du cambium et vieillissement du bois. La duraminisation n'affecte pas les propriétés anatomiques de base: longueur de fibres, épaisseur de paroi des fibres, diamètre et fréquence des vaisseaux.

L'hétérogénéité et l'anisotropie du bois se manifestent donc à différents niveaux d'organisation. L'analyse de ces différents niveaux d'organisation permet d'expliquer la variabilité des caractéristiques du bois.

Troisième partie:

Protocole d'essais expérimental

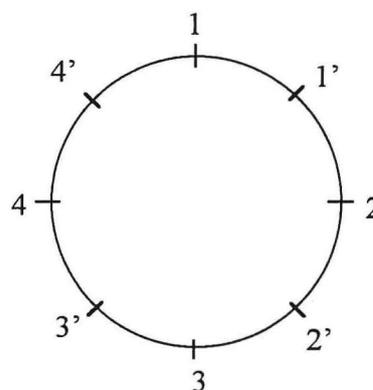
III.1 L'essence étudiée

16 grumes provenant de 14 Eucalyptus de diamètre voisin de 25 cm et de longueur 4m ont été retenues. Les arbres, âgés de 12 ans, ont été donnés par la station de Toulouse de l'AFOCEL (Association Forêt Cellulose), organisme de Recherche et de Développement financé par l'industrie papetière. Ce sont tous des clones 208 de l'hybride *E. Gunniix E. Dalrympleana*. Ce croisement d'eucalyptus *Gunniix* et de *Dalrympleana* a été choisi pour sa capacité à résister au froid. La taille moyenne de cette essence est comprise entre 50 et 60 mètres. Il nécessite une hygrométrie d'environ 1000 mm d'eau par an.

Les 14 grumes de pied ont été codifiées par un numéro suivi de la lettre A. Les deux billes supérieures provenant de l'arbre 6 et de l'arbre 9 ont été codifiées par la lettre B. Après marquage, les grumes ont été transportées immédiatement après application de mesures tendant à empêcher l'expansion ou l'apparition de fentes : peinture anti-fentes pour éviter le séchage, connecteurs «gang nail». Vu le petit diamètre des arbres, aucune fente importante n'a été relevée bien que les mesures de DRLM et la réputation de ce clone papetier peu adéquat pour la production de bois d'oeuvre montrent une forte nervosité qui se traduira par des déformations importantes au sciage.

Il était prévu de réaliser les mesures de DRLM dans les bois sur pied mais en raison du vent, nous avons été obligé d'abattre les arbres pour pouvoir effectuer les mesures. En effet, l'action du vent empêchait toute lecture fiable du capteur CIRAD. Compte tenu de l'absence de fentes d'abattage significatives, et de l'aspect vertical et symétrique des arbres, on peut espérer que la mesure sur bois abattus reflète bien l'état mécanique du bois sur pied (peu modifié par l'abattage). Par ailleurs, pour les besoins stricts de notre étude, la mesure sur bois rond abattu est intéressante car elle a plus de chances d'être reliée aux déformations des sciages (qui résultent de la libération des contraintes entre la grume abattue et la planche sciée).

Une première série de huit mesures a été prise sur la périphérie de l'arbre à une hauteur d'environ 1,30m. Deux autres séries de mesures seront faites sur bois abattus. La numérotation des repères périphériques se fait comme le montre le schéma. Ces repères seront conservés tout au long des essais sur les coupes transversales des grumes afin de pouvoir repérer la position du plot dans le billon.



III.2 Mesure des déformations résiduelles longitudinales de maturation.

La première étape de cette étude est d'effectuer des mesures de Déformations Résiduelles Longitudinales de Maturation (DRLM) sur les billes d'eucalyptus. Cette méthode CIRAD dite du trou unique repose sur la libération des contraintes sur la périphérie de l'arbre. Afin d'obtenir une modélisation du champ de contrainte sur la périphérie de l'arbre, on perce 8 trous sur la circonférence. Les valeurs des DRLM obtenues pour l'eucalyptus Gundal sont toujours des retraits (comptés par convention positivement). En effet comme tous les angiospermes, l'eucalyptus forme du bois normalement tendu ou du bois de tension fortement tendu. Ainsi lorsque l'on perce un trou, les pointes ont tendance à s'écarter de leur position initiale. Les valeurs mesurées par le capteur sont généralement comprises entre 30 et 190 μm .

Lors de sortie sur le terrain, nous avons relevé 8 mesures par arbre. Afin d'établir une modélisation plus précise du champ des DRLM, j'ai procédé à deux autres séries de 8 mesures, au milieu et sur l'autre extrémité de la grume. Les mesure prises aux extrémités sont effectuées à au moins 2 diamètres pour éviter les effets de bord dus à la libération des contraintes longitudinales sur les surfaces tronçonnées.

La relation qui existe entre la variation de distance entre les pointes $\Delta\delta$ et la déformation de maturation (dans le sens longitudinal) α_L est donnée par la formule:

$$\alpha_L = K \times \Delta\delta$$

K: en microdéformation/microns

$\Delta\delta$: variation de distance entre les pointes (en microns)

α_L : déformation de maturation (en microdéformations)

K est un coefficient qui dépend théoriquement du rapport diamètre du trou/écartement des pointes et de l'anisotropie du bois (cf Annexe 1). Ce paramètre varie de 9 à 17 en considérant la géométrie du capteur CIRAD et les plages de variations de l'anisotropie élastique du bois. Ces valeurs ont été validées par des comparaisons entre la mesure par la méthode du trou unique et d'autres méthodes. La formule précédente ne tient pas compte d'un terme faisant apparaître la contribution de la déformation de maturation tangentielle. Ce terme peut être négligé avec une erreur de 5 à 10%.

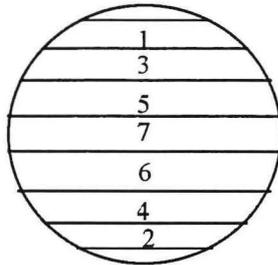
III.3 Mesure de retrait longitudinal et de la courbure

Pendant toute la durée de la campagne d'essai, les grumes ont été arrosées régulièrement afin d'éviter l'apparition prématurée de fentes dues en grande partie au séchage. Le tronçonnage à une longueur de 2,50 mètres était effectué juste avant le débit.

Les deux modes de débit retenus pour cette étude sont les suivants.

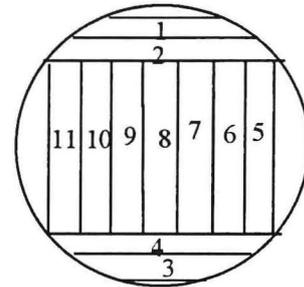
Débit en plots avec retournement

(débit n°1)



Débit sur noyau sans retournement

Débit n°2



Le matériel de sciage est une scie de tête inclinée à 45°. Cette scie a été mise au point il y a une trentaine d'années par M. CHARDIN. Les avantages de cette scie inclinée sont d'une part le faible griffage de la grume sur le chariot (puisqu'il est lui aussi incliné) et d'autre part l'amélioration significative de l'état de surface des plots débités (la planche ne s'arrache pas brutalement en fin de sciage).

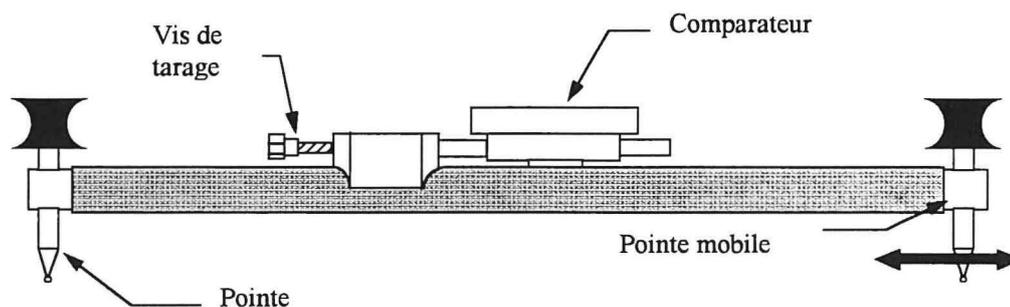
Il n'a pas été décidé d'opérer d'autres modes de débit en raison du nombre restreint de grumes à scier. Cependant, au cours des essais de légères modifications des modes de débit ont été testées. Une grume a été sciée en plot sans opérer de retournement. Une autre a été débitée en utilisant le mode de débit sur noyau en effectuant des retournements successifs une fois que les quatre premières fausses dosses ont été prélevées. Les 16 billes d'eucalyptus ont été divisées suivant les deux modes de débit en prenant les grumes de plus grand diamètre pour le débit sur noyau. Malgré cela, il existe des grumes débitées sur noyau ne possédant que deux fausses dosses de part et d'autre de la grume. Dans tous les cas, l'épaisseur des plots a été fixée à 20 mm (le choix d'une épaisseur faible vise à accentuer les déformations).

Juste après le tronçonnage, les repères de DRLM étaient réécrits sur les deux faces des billons. Des photos des deux extrémités ont été prises de manière à enregistrer la géométrie de la coupe transversale de chaque arbre. Par convention, les deux modes de débits débutaient par le sciage de la dosse ayant le niveau de DRLM bois sur pied le plus élevé. En ce qui concerne le débit sur noyau, l'équarri (c'est à dire le reste de la grume une fois que les dosses et fausses dosses sont débitées) est débité en commençant par le coté possédant la DRLM la plus importante.

III.3.1 Mesure de retrait longitudinal

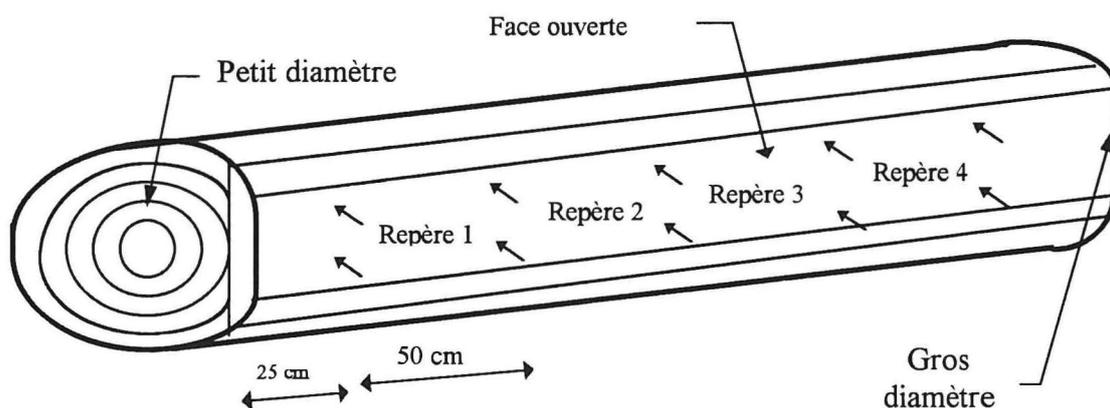
Les mesures de retrait longitudinal ont été effectuées à l'aide d'un extensomètre Huggenberger n° D500 80.325 . Gracieusement prêté par l'INRA de Nancy, cet appareil est constitué d'un tube de 50 cm de long avec en son centre un comparateur à aiguille d'une précision du micron. A chaque extrémité du tube sont disposées deux supports comportant chacun une pointe à tête sphérique. L'un des deux supports est mobile dans le sens de la longueur; il coulisse à l'intérieur du tube. Le déplacement de la pointe est donné par les variations du comparateur.

Extensomètre HUGGENBERGER



La course de la pointe mobile est d'environ 5 mm. La mesure du retrait longitudinal a été effectuée après enlèvement de la première dosse. Cette mesure a été réalisée sur chacune des planches avant et après sciage. Le retrait est obtenu par soustraction des données avant et après sciage. L'extensomètre ayant une base de 50 cm, j'ai réalisé deux mesures de retrait tout les 50 cm comme le montre le schéma ci-dessous. Pour obtenir une mesure de retrait longitudinal par repère, la moyenne de ces deux mesures a été retenue. Pendant tout les essais, je me suis placé à 25 cm des deux extrémités de la grume afin de limiter les effets de bord.

Des pointes à tête conique (symbolisées par les petites flèches sur le schéma) ont été plantées sur la face ouverte de la grume. Elles ont pour but de stabiliser l'Huggenberger sur la grume et ainsi d'avoir une lecture précise du retrait. La distance de ces plots par rapport au centre de la planche variaient entre 5 et 10 cm en raison de la conicité de la grume. Ces pointes en laiton recommandent la plus grande attention en raison de leur petitesse et de leur fragilité. D'ailleurs, il était nécessaire de procéder à des avant-trous pour faciliter la pénétration de la pointe dans le bois. Toutes les mesures de retrait longitudinal se trouvent en annexe 3.

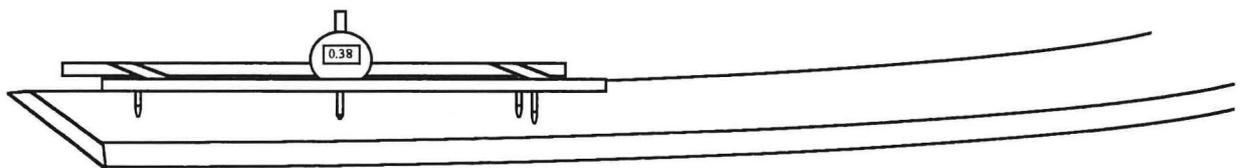


Une fois que les mesures sont faites, on scie la grume; puis on procède à une autre série de mesures après sciage. La première série de mesures correspond au côté de la grume de plus petit diamètre. Cette orientation sera conservée tout au long de la campagne d'essai.

III.3.2 Mesure de la courbure

Cette mesure est effectuée à l'aide d'une règle munie de trois appuis. Elle possède en son centre un comparateur en position verticale qui permet de mesurer la flèche sur une longueur de 50 cm. Sur la plupart des planches, nous n'avons effectué qu'une mesure après sciage en pensant que ce serait une valeur de courbure aisée à modéliser. Les premiers résultats ont montré que la flèche sur 50 cm n'intègre pas qu'une courbure mais aussi des rugosités et variations d'épaisseur. Des mesures avant et après sciage ont été prises sur les 6 dernières grumes pour permettre le calcul d'une grandeur différentielle.

Il est important de souligner la variation de cette courbure même sur une petite distance. En effet, l'état de surface de la planche rendu rugueux par le sciage entraîne des écarts de flèches qui peuvent être de l'ordre de 50% sur une dizaine de centimètres. La mesure après sciage a pour objectif de donner une allure générale de déformation de la planche.



Pour limiter la flexion de la planche induite par son propre poids, la mesure de la courbure a été effectuée en positionnant le plot sur son chant. Les courbures se situent en annexe 3.

III.4 Mesure des déformations de sciage

Nous avons vu précédemment que les plots ou les avivés subissaient des déformations dues au sciage, aux contraintes internes (et en particulier des contraintes de croissances) de l'arbre et au séchage. Ces déformations peuvent être classées en quatre catégories.

- ♦ La flèche de face:

C'est une courbure longitudinale sur la largeur de la planche (« bow » en anglais).

- ♦ La flèche de rive:

C'est une courbure longitudinale sur le chant c'est à dire l'épaisseur de la planche (« crook » en anglais).

- ♦ Le tuilage:

C'est une courbure transversale sur la section de la planche (« cup » en anglais)

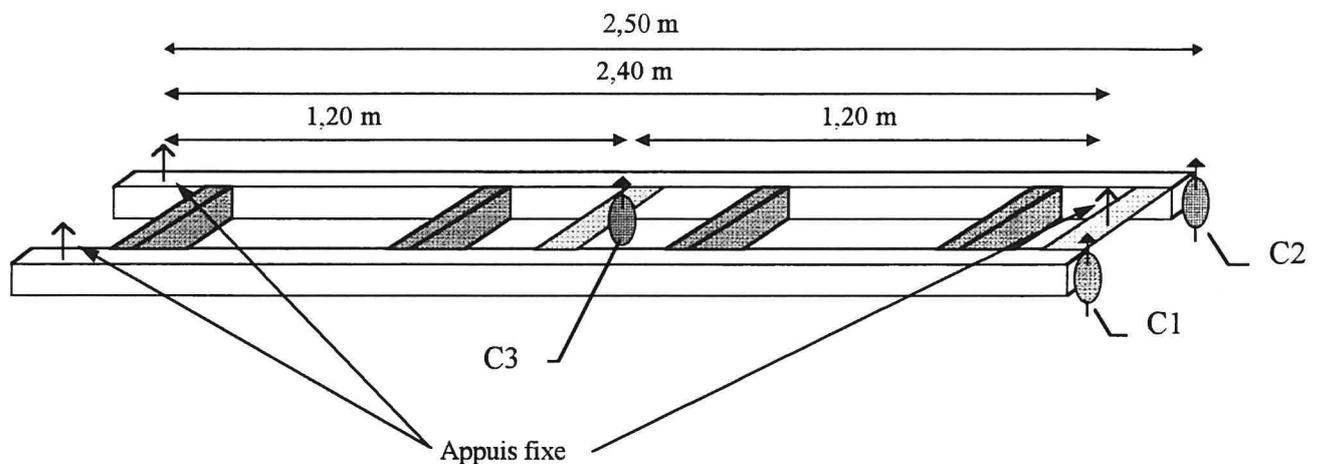
- ♦ Le gauchissement:

C'est un vrillement de la planche dans le sens de la longueur (« twist » en anglais)

Toutes les données de ces déformations se situent en annexe 4.

Il se peut, et cela n'est pas un fait rare, que ces déformations se combinent entre elles. Pour évaluer précisément toutes ces déformations, nous avons conçu grâce à des plans d'un dispositif suédois fournis par l'INRA de Nancy, une règle munie de trois comparateurs et de trois appuis fixe (fig 1). Les comparateurs sont tarés de manière à ce que les points d'appuis et les palpeurs sont dans un plan parallèle au sol. La mesure des déformations a été faite sur des avivés de section 20 x 120 mm.

Figure 1: Schéma du Banc d'essai suédois



- C1, C2: Comparateurs servant à la mesure du tuilage et du gauchissement
 C3: Comparateur servant à la mesure de la flèche de face et la flèche de rive.

Cette règle est posée sur un trépied de 1,30 m de haut pour faciliter les mesures. Les planches sont disposées sur le banc suivant une même orientation. Toutes les mesures de retrait et de courbure ont été prises sur la face «ouverte» des plots. Dans un soucis de cohésion, il a été fait de même avec les mesures de flèches de face, de rive, de tuilage et de gauchissement. Par définition, nous appellerons « face ouverte », la face qui se trouve la plus éloignée de la moelle. Autrement dit, il s'agit de la face de la grume qui vient d'être découverte par l'opération de sciage. Ainsi pour la mesure des différentes déformations, la face ouverte se trouve posée sur les appuis fixes (fig. 2, fig. 3). De plus, l'extrémité de l'avivé provenant du petit diamètre de la grume était disposé du côté des deux comparateurs C1 et C2.

Figure 2: Mesure de la flèche de face

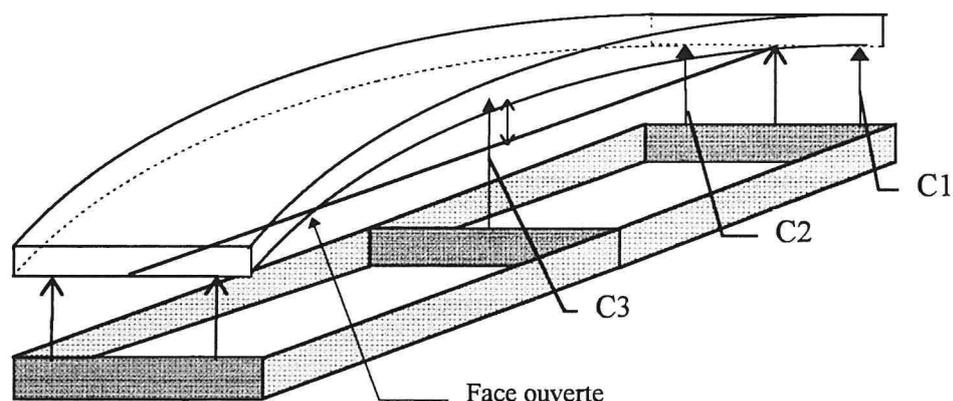
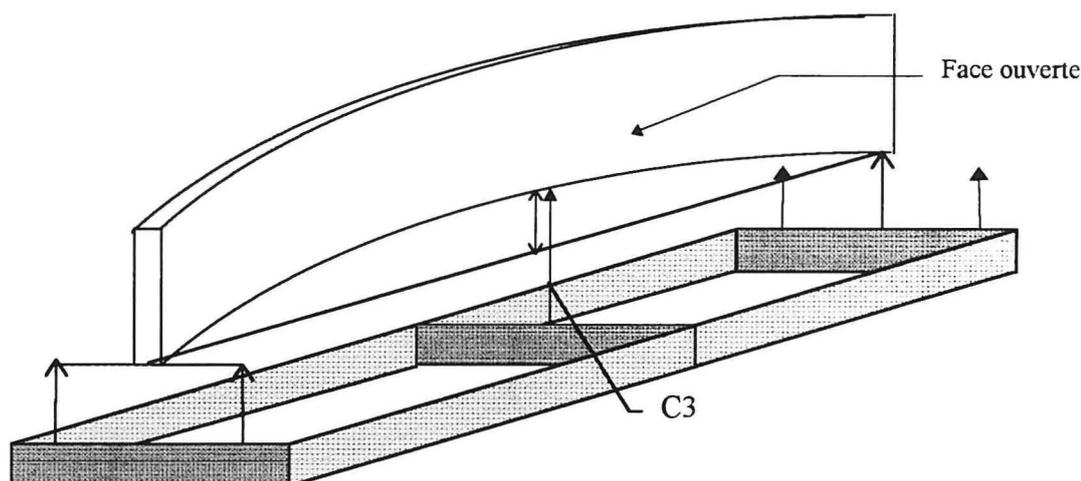


Figure 3: Mesure de la flèche de rive



Les comparateurs C1 et C2 permettent d'estimer le tuilage (fig 3) et le gauchissement (fig 4).

Figure 3: Mesure du tuilage

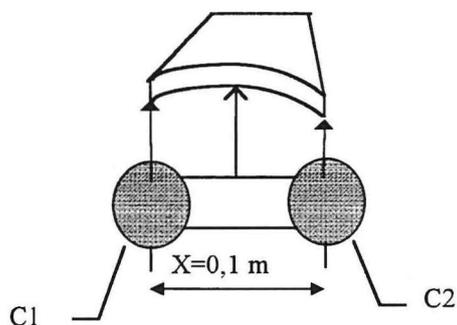
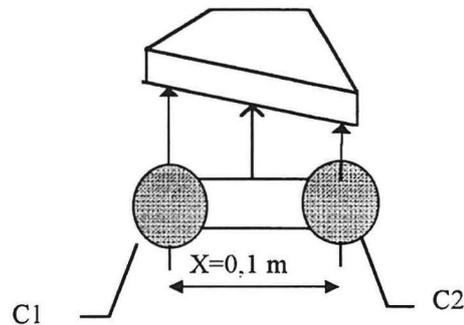


Figure 4: Mesure du gauchissement



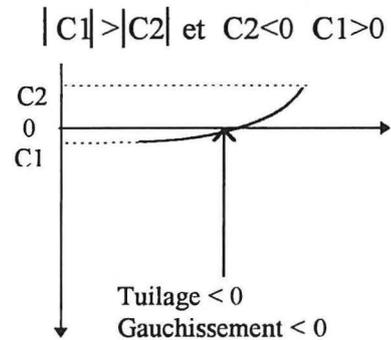
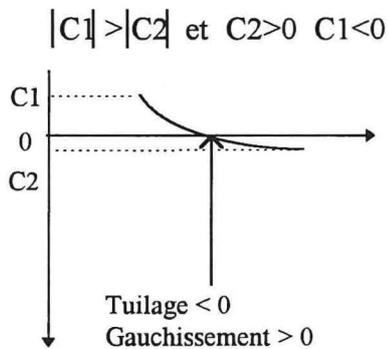
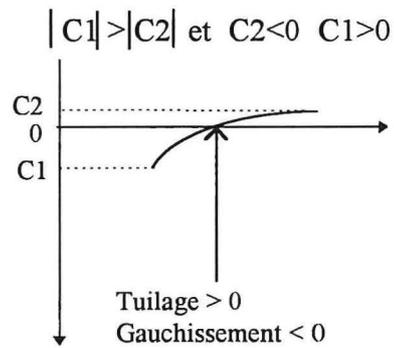
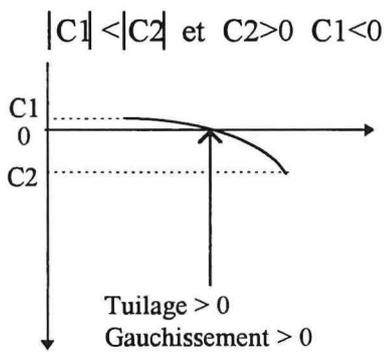
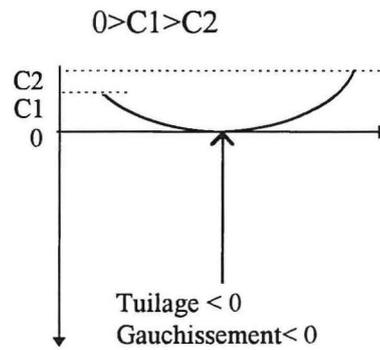
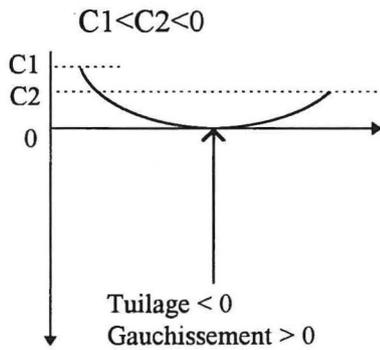
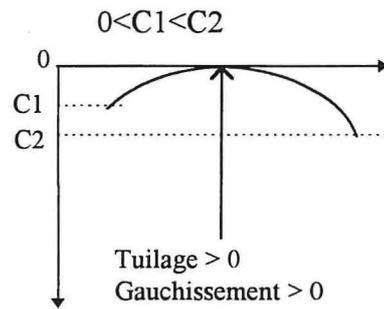
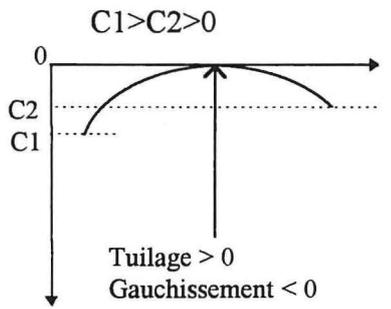
L'espacement entre les deux comparateurs C1 et C2 vaut 10 cm. Le tuilage et le gauchissement sont donnés par les formules suivantes.

$$\text{Tuilage} = \frac{C1 + C2}{2}$$

$$\text{Gauchissement} = \text{Arctan} \left(\frac{C2 - C1}{100} \right)$$

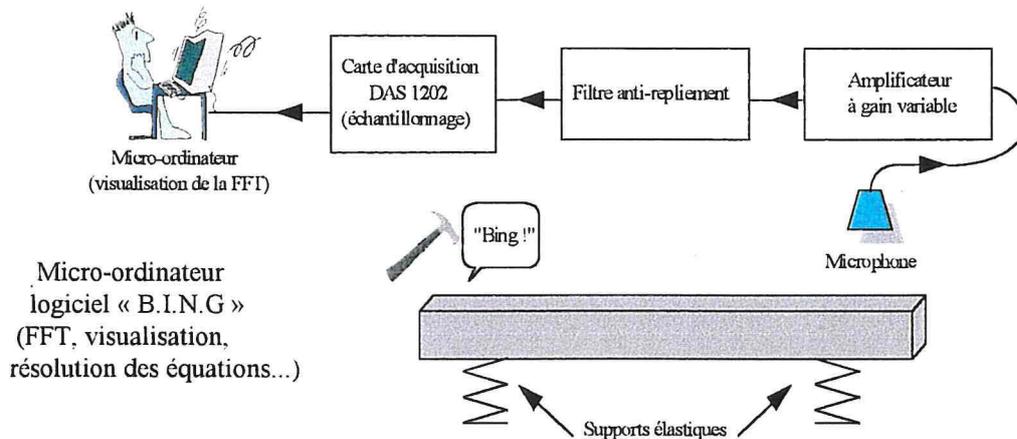
Pour compléter ces données, j'ai effectué cinq mesures de surépaisseurs tout les 50 cm au pied à coulisse. Les déformations étaient telles sur certaines planches que la course du comparateur central (30 mm) ne suffisait pas. La flèche de face ou de rive était dans ce cas évaluée approximativement en posant l'avivé sur une table de référence (comme par exemple la table de la dégauchisseuse) et par mesure à l'aide d'un simple réglet. L'orientation (face ouverte contre la table) était respectée. Pendant toute la campagne de mesure des déformations, on n'a pas tenue compte de la flexion due au poids propre des planches sur la règle. Pourtant, celle-ci était de l'ordre de 2 à 3 cm. Je me suis donc placé dans une optique d'essais comparatifs.

Les déplacements vers le haut des comparateurs sont comptés négativement. Le tuilage et le gauchissement sont orientés comme le montrent les schémas ci-dessous. Les valeurs C1 et C2 correspondent aux données fournies par les comparateurs 1 et 2.



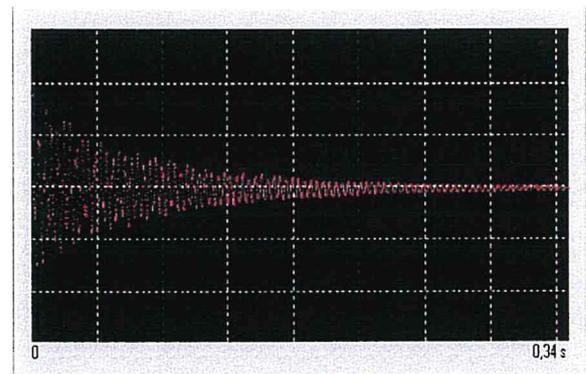
III.4 Mesure du module d'élasticité

La mesure du module d'élasticité est effectuée à l'aide de la méthode B.I.N.G. (Beam Identification by Nondestructive Grading). Cette technique mise au point depuis quelques années au CIRAD Forêt permet de déterminer les caractéristiques physico-mécaniques des poutres (module d'élasticité en flexion, en compression, masse volumique, module de cisaillement) par simple excitation vibratoire. Dans un premier temps, on place un avivé de bois sur deux supports élastiques (mousse synthétique, élastiques tendus...), ensuite un choc mécanique est réalisé à l'une des extrémités de la poutre. La poutre se met alors à vibrer dans tous ses modes naturels de vibration. Le BING sollicite la mise en place de plusieurs éléments

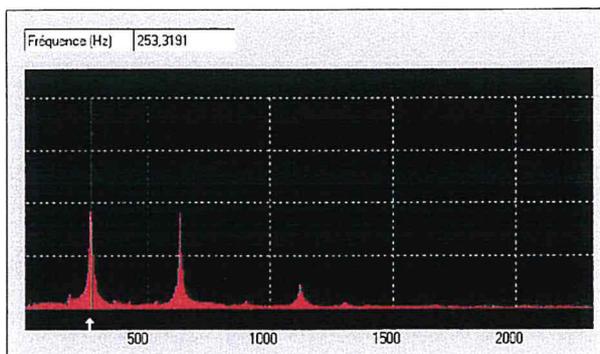


Visualisation du signal acoustique

Un microphone récupère alors l'information acoustique et la transforme en signal électrique. Ce signal est tout d'abord amplifié puis filtré par un appareil éliminant les bruits parasites.



Spectre de Fourier



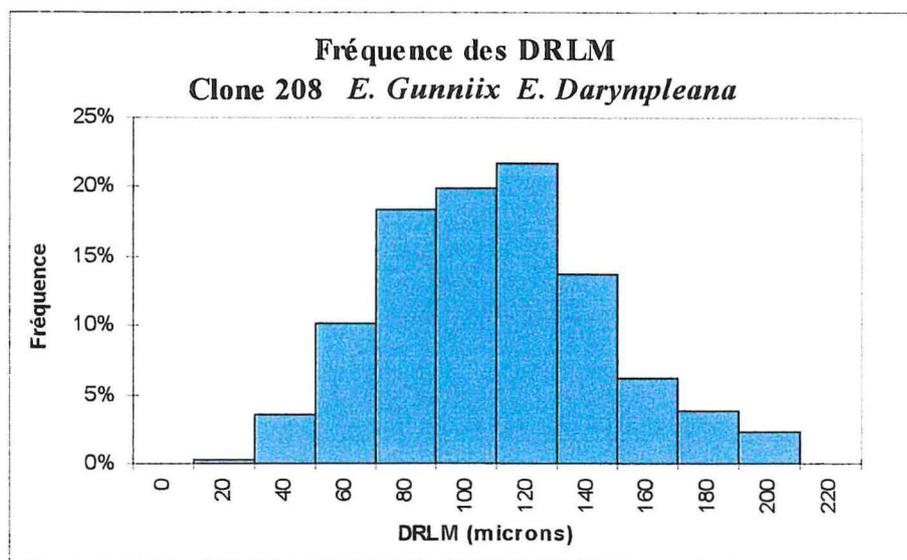
Il s'en suit alors une décomposition du signal en série de Fourier qui débouche sur la détermination des fréquences correspondant aux différents modes de vibration de l'avivé. Selon la direction de la frappe et la position du microphone on peut déduire grâce à ces fréquences caractéristiques le module d'élasticité. Le résultat est ainsi affiché sur l'écran d'un micro-ordinateur. On procèdera à la mesure du module d'élasticité sur la totalité des avivés.

Quatrième partie:

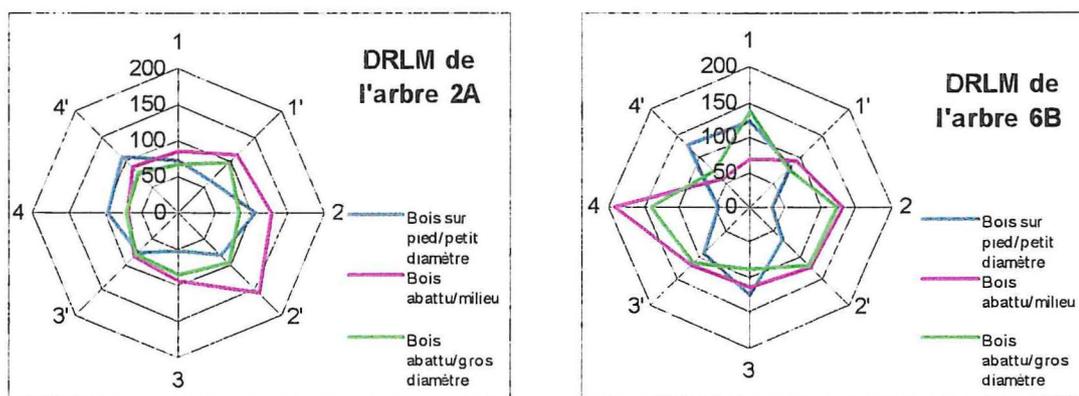
Résultats et Analyses

IV.1 Les déformations résiduelles longitudinales de maturations

Une série de 384 mesures de DRLM a donc été effectuée sur les 16 grumes d'*Eucalyptus Gunnii Darympleana*. Toutes ces données sont regroupés dans le tableau situé en Annexe 2. Les classes de DRLM et leurs fréquences sont retranscrites dans l'histogramme suivant. Elles sont en accord avec les mesures réalisées sur le même clone par J. GERARD lors de sa thèse (Ces arbres ne provenaient pas de la même parcelle que ceux étudiés dans le cadre du projet SiCroDef, et ils étaient plus jeunes (9 ans)).

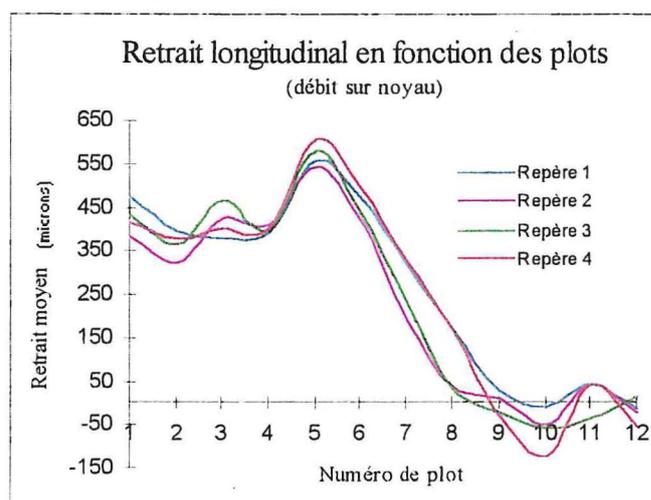
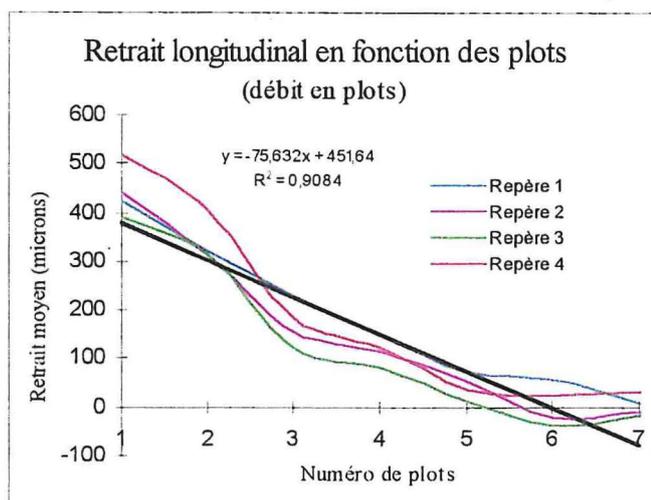


60 % des DRLM sont regroupées sur trois classes comprises entre 80 et 120 microns. Ce mode de distribution montre que le bois dit « normal » est en moyenne très tendu. Ces arbres ne présentent pas de valeurs de DRLM très élevées (300 μm). Les trois séries de mesures effectuées à chaque extrémité et au milieu de chaque grume ont été représentées par des diagrammes type radar. Ce mode de représentation permet de visualiser assez rapidement la grande variabilité des DRLM dans le sens de la longueur. On a pu constater des valeurs de DRLM passant de 50 à 190 microns pour le même repère (Arbre 6B). Par contre, d'autres arbres ont un champ de contraintes périphériques à peu près homogène. C'est le cas de l'arbre 2A. Ce problème de variabilité importante de la DRLM en fonction de la longueur rendra plus difficile la modélisation du champ de contrainte dans l'arbre (travail effectuée par le LRBB et le CIRAD MEB dans le projet SiCroDef).



IV.2 Le retrait longitudinal

Le retrait longitudinal a été mesuré sur la face ouverte de la grume. Nous avons effectué 4 séries de deux mesures sur cette face en prenant comme Repère 1 le côté de petit diamètre pour placer la première série de mesures. Une fois les pointes à tête conique placées sur la grume, le retrait est obtenu par soustraction de la distance séparant les pointes avant et après sciage. La première observation que l'on peut faire de ces mesures est la tendance à la diminution du retrait longitudinal au fur et à mesure du sciage. En d'autres termes plus on débite la grume plus le retrait est faible. La comparaison des deux modes de débit permet d'avancer quelques hypothèses sur le comportement de chaque plot.



Pour les deux modes de sciage, le retrait diminue en fonction de l'avancement du débit. Plus on avance dans la grume, plus on libère des contraintes et moins il en reste à libérer. La monotonie de la décroissance n'est pourtant pas intuitive. Lors du débit en plots, le retrait provenant des quatre séries de mesures a tendance à décroître en fonction du rayon de la grume. Cette hypothèse est confirmée lorsqu'on observe le retrait longitudinal pour le mode de débit sur noyau. Sur les dosses et fausses dosses on observe une baisse du retrait d'une manière à peu près identique au premier mode de débit. Puis lorsqu'on retourne la grume et qu'on débite la cinquième dosse, le retrait longitudinal augmente fortement pour dépasser parfois la valeur trouvée initialement lors du débit de la première dosse. Ensuite, le retrait diminue linéairement comme cela est observé pour le débit en plot.

La forte valeur de retrait enregistrée sur cette planche n°5 s'explique par l'emplacement de ce plot à la périphérie de la grume. Cette valeur, supérieure à celle trouvée au début du sciage, peut s'expliquer par le fait que l'on ne raisonne plus sur des plots mais sur des avivés. Les délignures étant purgées, cela modifie de nouveau le champ de contrainte de ce qu'il reste de la grume. Il est possible que ces délignures «équilibreraient» l'avivé et limiteraient le retrait longitudinal. Mais cette augmentation du retrait sur les plots n°5 n'est pas un phénomène intuitif. On attendrait plutôt une valeur de retrait inférieure ou égale à celle trouvée lors du sciage du premier plot. L'opération de délignage sur les planches débitées en plots se soldait par l'apparition immédiate de fentes importantes. Ce phénomène de fendage se produisait sur les plots proches du plateau central. Les plus grosses fentes se situaient au milieu des plots centraux. Aucune fente n'a été recensée sur les plots débités sur noyau. Ces fentes sont dues à la libération brutale des contraintes.

En théorie cela aurait pour conséquences de faire décroître plus rapidement l'état de contrainte général de la grume. Or ces fentes se forment à la fin du sciage, intervalle de temps qui devrait se traduire par un relâchement complet de l'état de contrainte.

Ces premières observations montrent la corrélation étroite qui existe entre le retrait longitudinal et l'emplacement du plot dans la grume. Pourtant on ne peut affirmer que le retrait longitudinal dépend exclusivement de la distance séparant le plot du centre de la grume (supposée parfaitement cylindrique). En effet, la grume 12A a été débité en plots mais sans retournement; le retrait longitudinal diminue au fur et à mesure du débit. Bien que proche de la moelle, les derniers plots 6 et 7 se trouvaient au delà du centre de la grume. Pour ces planches, la distance plot/centre de la grume recommence à augmenter; pourtant le retrait continue à diminuer. Le retrait longitudinal dépend à la fois de la distance au centre (moelle) qui est une variable déterminante du champ de contraintes initial et de l'ordre dans lequel les planches sont débitées (Plus le débit avance, moins il reste de contraintes à libérer dans la grume).

IV.3 La courbure

La variation de courbure est mesurée à l'aide d'une règle munie de trois points fixes (cf. protocole expérimental). Cet appareil ne donnait qu'une approximation de la forme générale de la planche. En effet, la scie à ruban ne donnant pas un état de surface parfait, la valeur de cette mini flèche pouvait varier du simple au double sur quelques centimètres. Par abus de langage nous appellerons la courbure la flèche locale mesurée par la règle trois points. La véritable courbure se déduit de cette flèche par les équations suivantes (sous réserve que la seule déformation importante soit effectivement une courbure). Compte tenu de cette relation entre ρ et a , nous garderons la flèche locale comme référence.

$$\rho = 1/R \qquad R = \frac{25^2 + A^2}{2 \times A}$$

ρ : Courbure

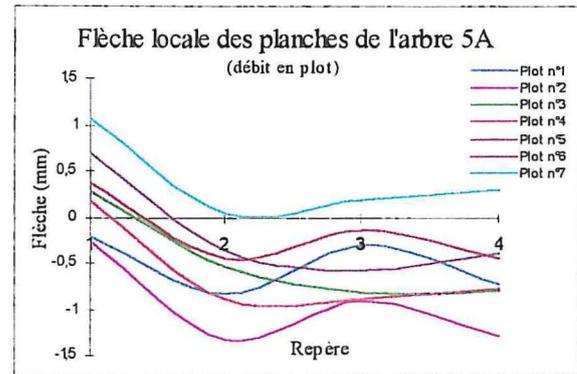
A: Flèche locale mesurée par la règle «trois points»

R: Rayon de courbure

Au début de la campagne d'essai, la mesure de la flèche sur 50 cm ne s'effectuait que sur les plots débités. Mais nous nous sommes aperçus que cette grandeur n'était pas uniquement une courbure mais prenait en compte des irrégularités de sciage. Nous nous sommes donc intéressés à la variation de cette flèche avant et après sciage. Malheureusement, cette grandeur n'a pu être mesurée que sur 6 grumes; sur ces 6 grumes, 5 ont été débitées en plots et la dernière a été débitée sur noyau.

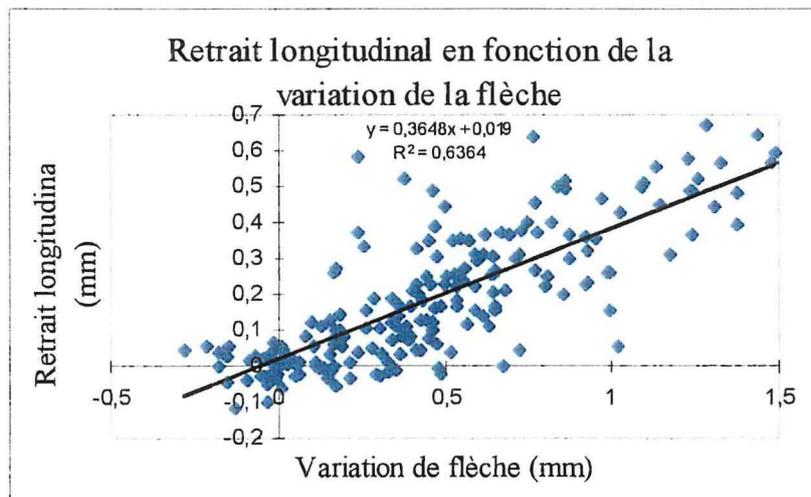
Les premières observations montrent que le plot a tendance à se dégager de la grume lors du passage de la scie. Ce phénomène est d'autant plus important lorsqu'on commence à débiter la première dosse. Lorsqu'on procède au retournement de la grume, le même phénomène se produit sans que l'orientation du plot ne se modifie. Cette flèche spontanée de la planche s'atténue au fur et à mesure du débit. Pour le débit en plot avec retournement, les plateaux centraux présentent peu ou pas de courbure. Pour le débit sur noyau sans retournement, les derniers avivés provenant de l'équarri ne sont pas non plus courbés. Tout comme pour le retrait, la baisse de la variation de la courbure doit être affectée à un relâchement progressif des contraintes.

Les flèches mesurées par la règle de 50 cm ont montré un profil général des plots plus détaillé. L'orientation de cette courbure ne se fait pas toujours dans le même sens. On observe généralement un point d'inflexion avec par conséquent un changement de signe pour la courbure. Le diagramme ci-contre représente la courbure des plots provenant de l'arbre 5A. Il s'agit bien ici de la flèche et non de la variation de la flèche avant et après sciage.



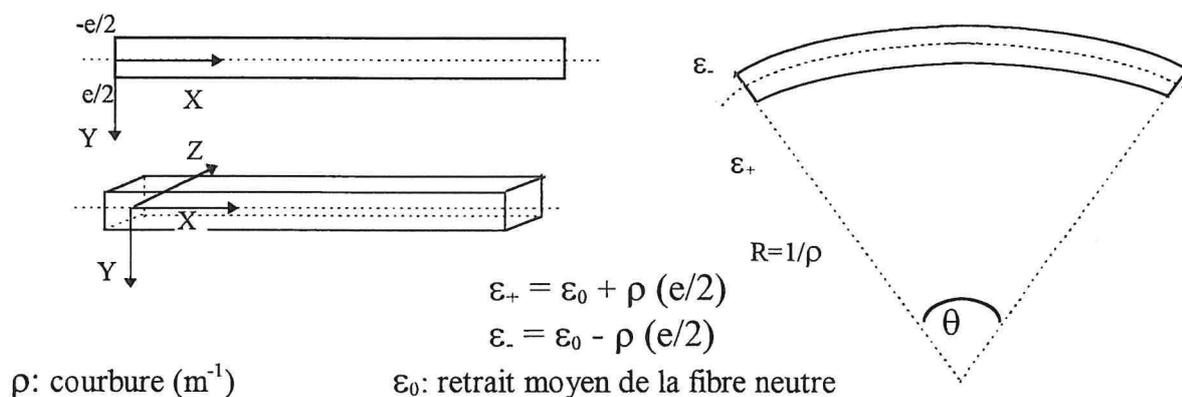
Ce mode de représentation permet de visualiser le profil des plots. Les repères 1,2,3 et 4 se trouvant en abscisse sont les emplacements où les mesures de retrait et courbure ont été prises. Pour rappel, le repère 1 est situé à 25 centimètres du côté petit diamètre de la grume. Les repères 1,2,3 et 4 sont espacés de 50 cm. Ces données confirment que la courbure générale des plots a tendance à diminuer plus on avance dans le débit.

Les résultats du graphe précédent sont à manier avec réserve. En effet sur d'autres billons, l'orientation de la courbure était devenue très aléatoire. Des plots, pourtant successifs, pouvaient avoir des courbures opposées. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire de considérer la variation de la courbure avant et après sciage. Cette variation est alors bien liée au retrait longitudinal comme le montre le graphe ci-dessous.



Ce graphique représente le retrait longitudinal en fonction de la variation de courbure tous plots et tous arbres confondus. Le coefficient de régression R^2 n'est pas très élevé ; ce manque de résolution est du en partie à la précision relative des données de la courbure.

Théoriquement, la déformation de la planche provoque un allongement des fibres sur l'une des faces et un raccourcissement sur la face opposée. Le retrait longitudinal se décompose donc en une somme de deux termes; l'un (ϵ_0) correspondant au retrait moyen de la fibre neutre (ensemble des points ne subissant pas d'allongement) et l'autre au retrait lié à la courbure de l'avivé ($\rho(e/2)$).

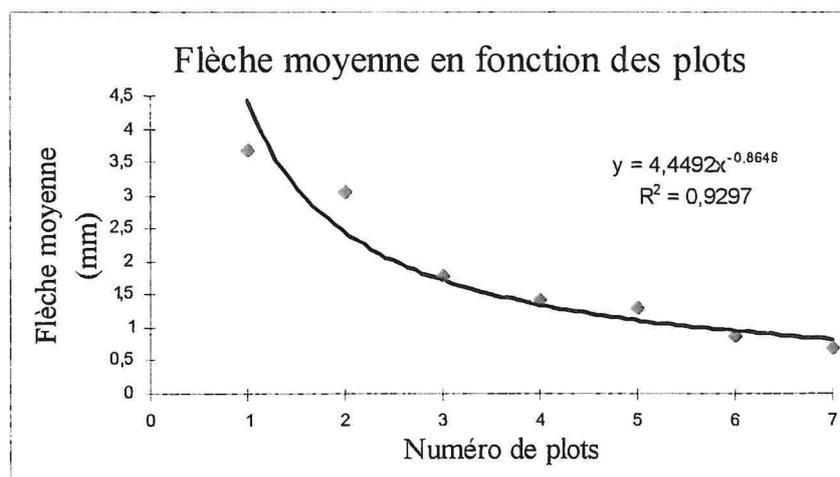


Le retrait ne dépend pas exclusivement de la courbure ρ . En passant à la contrainte, on obtient:

$$\sigma = - E_L \varepsilon(y) \quad \text{Or} \quad \varepsilon(y) = \varepsilon_0 + \rho y$$

$$\text{d'où} \quad \sigma = - E_L (\varepsilon_0 + \rho y) = - E_L \varepsilon_0 - E_L \rho y$$

Par conséquent, le retrait semble être proportionnel à une contrainte moyenne σ_0 (égale à $- E_L \varepsilon_0$) et la courbure est proportionnelle à un gradient de contrainte σ_1 (égal à $\rho E_L (e/2)$)
 Sur les cinq grumes débitées en plot sur lesquelles on a effectué des mesures de flèches avant et après sciage, nous avons effectué l'approximation suivante. Pour chaque plot, nous avons fait la somme des quatre flèches; puis nous avons moyenné cette valeur pour les cinq grumes. Il en ressort la courbe suivante.



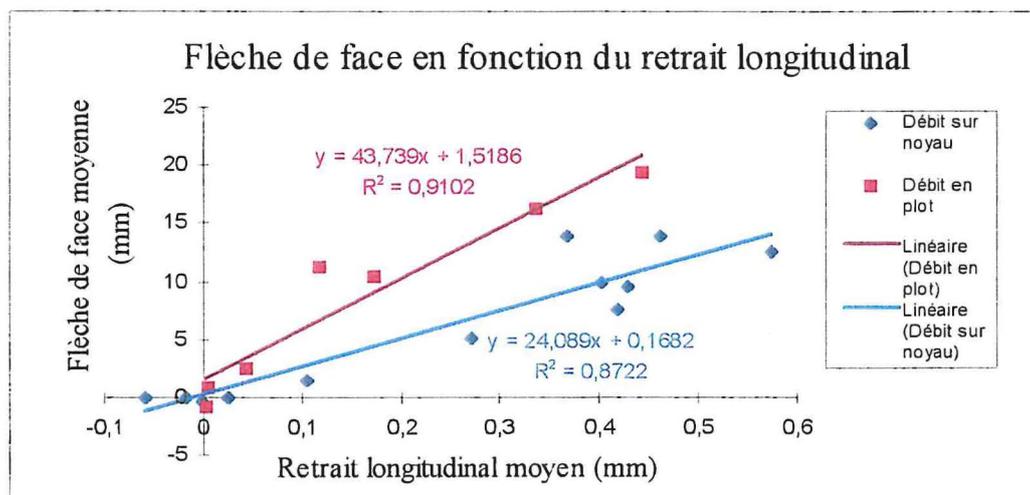
On remarque que pour un débit en plot avec retournement, la symétrie de la grume permet d'obtenir une modélisation de la valeur moyenne de flèche en fonction des plots. Par extension, on peut donc prévoir la flèche générale d'un plot connaissant son emplacement dans la grume (c'est à dire la distance séparant le plot de la moelle). La décroissance de la flèche moyenne peut être assimilée à une fonction hyperbolique ayant comme variable la distance séparant la planche de la moelle. Cette modélisation semble n'être valable que pour le débit en plot avec retournement, en effet ce mode de sciage permet de libérer uniformément et régulièrement les contraintes tout au long de la coupe. La grande variabilité dans la prise de la flèche moyenne rend l'interprétation de cette donnée assez problématique. C'est pourquoi dans la suite du rapport les données de référence seront le retrait longitudinal et bien sûr les valeurs des déformations résiduelles longitudinales de maturation.

IV.4 Mesure des déformations de sciage sur la règle

IV.4.1 La flèche de face

La flèche de face est mesurée sur la règle décrite dans le protocole expérimental. Prise entre des appuis fixes distants de 2,40 mètres, cette mesure tient compte de la flexion de l'avivé. Ainsi la mesure donnée par le comparateur central comprend la flèche de face de l'avivé et la flexion imposée par son poids propre. L'orientation de la planche sur cette règle a été conservée tout au long des essais. La flèche de face et toutes les autres déformations ont été prises sur la face ouverte des plots. Ce choix est délibéré car cette orientation fait que la courbure de la planche s'oppose à la flexion de l'avivé.

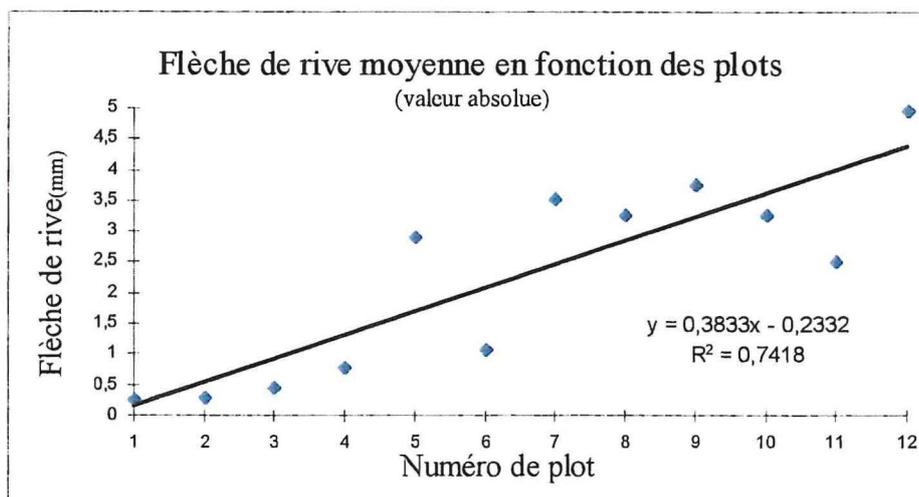
Une tendance générale se dégage de ses données.



La flèche de face et le retrait longitudinal ont été moyennés pour chaque grume et pour chaque plots. On remarque que, d'une manière générale, le débit en plot accentue la flèche de face. Même en présence de retrait important la flèche de face est moins élevée pour un débit sur noyau que pour un débit en plot. Le débit sur noyau en libérant les contraintes de croissance plus rapidement dans le temps limite la flèche de face.

IV.4.2 La flèche de rive.

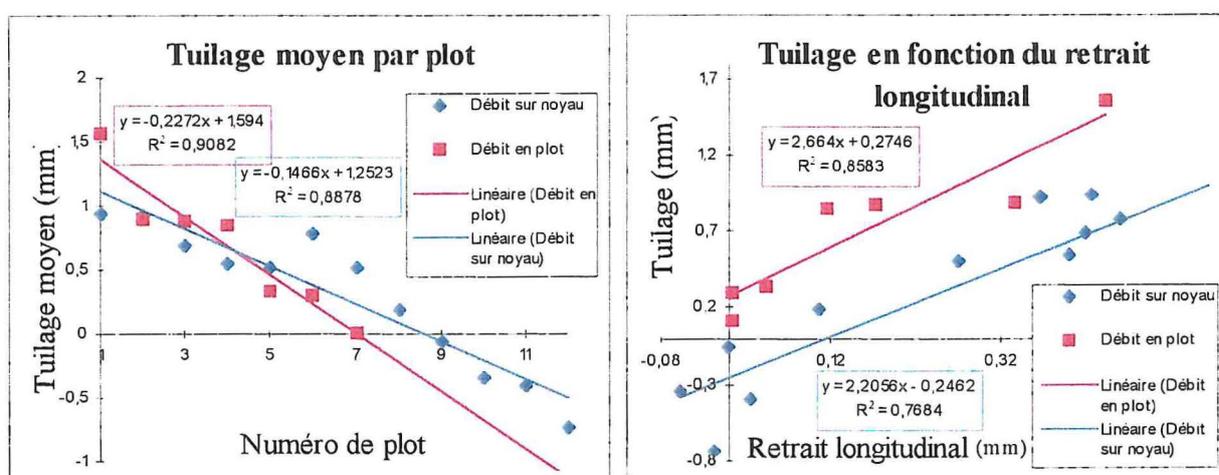
La flèche de rive est une donnée assez difficile à interpréter. En effet, la mesure de cette déformation est prise sur le chant inférieur de la face ouverte du plot (cf. protocole d'essais); or on procède à des retournements. Ainsi le chant inférieur d'un plot n devient le chant supérieur pour le plot n+1. Le signe de cette grandeur peut donc changer d'un plot à un autre. On observe quand même une tendance à l'augmentation (en valeur absolue) de la flèche de rive en fonction des plots. Les plots centraux présentent des flèches de chants généralement supérieures à celles trouvées sur les fausses dorsales.



Cette propension peut s'expliquer par la distribution des contraintes dans la grume (cf. schéma des distributions). Nous avons vu précédemment que les contraintes de croissance sont fonction du rayon. En début de sciage, les contraintes agissent directement sur la surface du plot et provoquent une flèche de face. Lorsque le débit est avancé, les contraintes restantes n'agissent plus sur la surface mais sur le chant du plot. La concentration de ces efforts sur une petite surface expliquerait non seulement les flèches de rives élevées mais aussi l'apparition des fentes sur les plateaux de coeur. Malgré une interprétation difficile des résultats, il ressort des mesures des flèches de rive que cette déformation est plus accentuée lors du débit en plot que pour le débit sur noyau.

IV.4.3 Le tuilage

Pour rappel, le tuilage est obtenu en effectuant la moyenne arithmétique des valeurs lues sur les comparateurs C1 et C2. Les deux graphes suivants donnent le tuilage moyen en fonction des plots et en fonction du retrait longitudinal.



D'une manière générale, on remarque que l'importance du tuilage varie en fonction du mode de débit. Le tuilage a tendance à s'annuler au fur et à mesure du sciage. Le plateau central ne présente pas de tuilage. Alors que pour le débit sur noyau, on constate que le tuilage s'inverse une fois la moelle dépassée. Pour observation, la grume 12A a été débitée en plots

mais sans effectuer de retournement. Lorsqu'on étudie la variation du tuilage en fonction des plots, on remarque que le tuilage suit à peu de choses près la même variation que pour le débit sur noyau. On peut donc conclure qu'une inversion du tuilage se produit une fois que l'on a passé le plateau central.

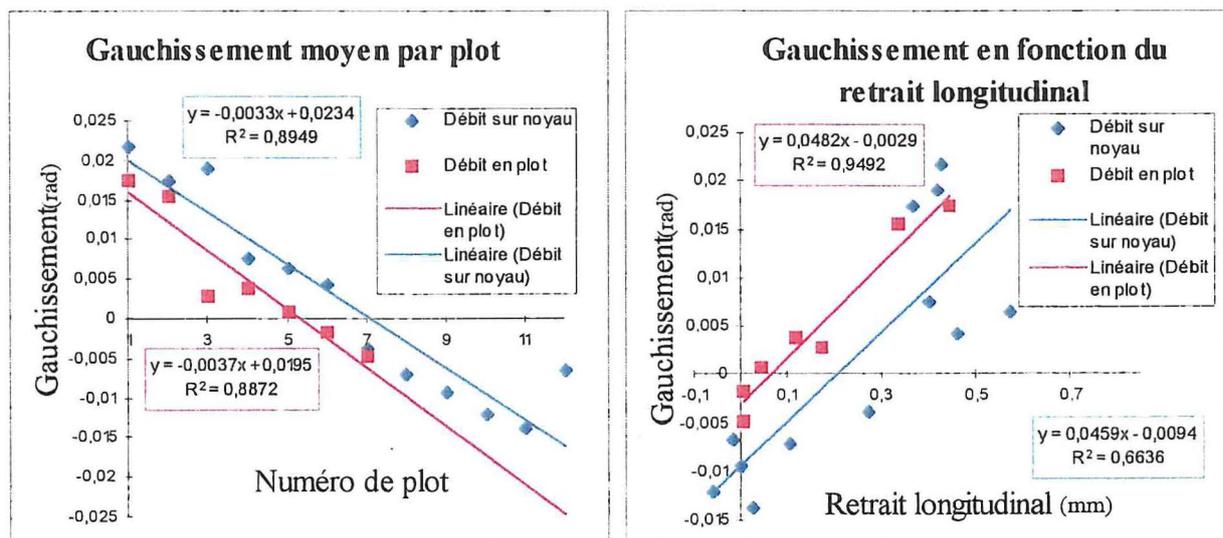
Pour les premiers sciages, le tuilage est en moyenne plus important pour le débit en plot que pour le débit sur noyau. D'ailleurs, pour une valeur de retrait donnée, le tuilage est proportionnellement plus élevé pour le débit n°1 que pour le débit n°2. De même, le coefficient directeur de la droite de régression du tuilage est plus élevé pour le débit en plot que pour le débit sur noyau. Cette observation vient corroborer le fait que la libération des contraintes est plus rapide et spontanée dans le débit en plot. L'annulation du tuilage s'explique par la symétrie du premier débit et la distribution des contraintes (dépendant du rayon) semble être la raison principale du changement de signe du tuilage pour le débit sur noyau.

IV.4.4 Le gauchissement

Le gauchissement se caractérise par le vrillement de la planche compté positivement dans le cas où l'inclinaison se fait dans le sens horaire. Le gauchissement est donné par la formule:

$$G = \text{Arctan} \frac{(C2-C1)}{X}$$

- G: Gauchissement (Rad)
 X: Distance entre les deux comparateurs (égal à 100 mm)
 C1 et C2: Valeurs (mm) lues sur les comparateurs C1 et C2

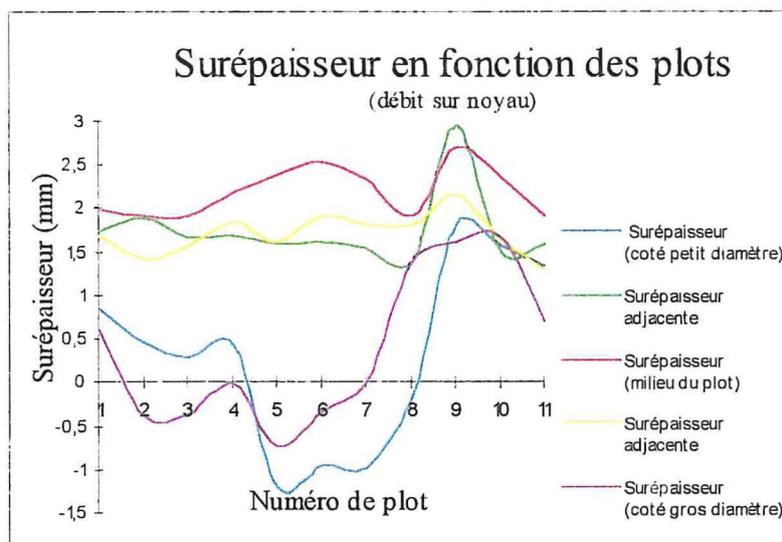
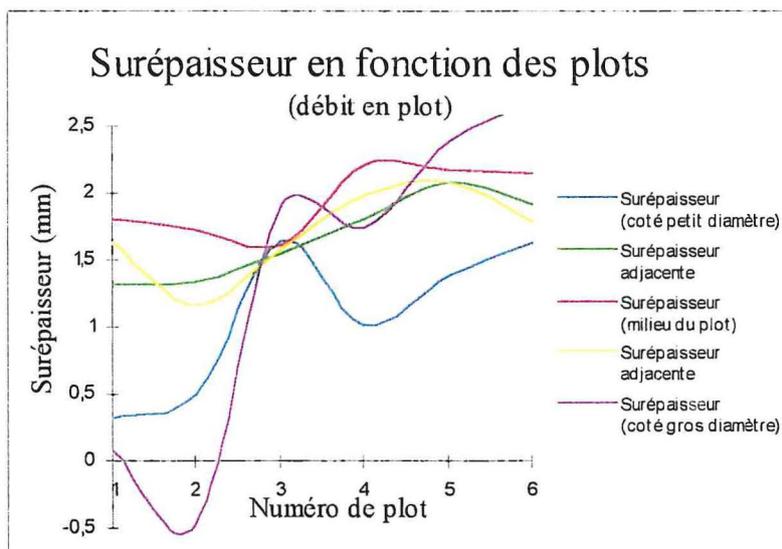


Il semblerait que le phénomène de gauchissement soit indépendant du mode de débit. Dans les deux cas, on observe une baisse de cette valeur avec un changement de signe. Pour le débit en plot, le changement de signe s'opère en moyenne au niveau du plot n°5. Le plateau central central (plot n°7) a un gauchissement négatif. Contrairement au tuilage, le gauchissement ne suit pas la symétrie du débit de la grume; si tel avait été le cas, le plot n°7 aurait eu un gauchissement nul. Il obéit plutôt à la libération et la redistribution des contraintes lors du sciage. Il semblerait que le gauchissement suive une loi dépendant de l'avancement du débit (numéro de plot) plutôt que de l'emplacement du plot dans la grume. Lorsqu'on observe les courbes du gauchissement en fonction des plots, on remarque qu'elles ont à peu de choses près le même sens de variations; pourtant le débit sur plot avec retournement est un débit

parfaitement symétrique alors que le débit sur noyau ne l'est pas. C'est pourquoi on ne peut pas conclure que l'importance du gauchissement résulte de la position de l'avivé dans la grume. Il semblerait que le gauchissement dépende du facteur temps. En effet un avivé scié en fin de débit présente un gauchissement toujours inférieur à ceux du début et cela quelque soit le mode de sciage.

IV.4.5 La surépaisseur

Sur chaque avivé, j'ai effectué cinq mesures de l'épaisseur à l'aide d'un pied à coulisse. Ces cinq mesures sont relevées à égale distance les unes des autres. Une mesure a été prise à chaque extrémité. Les surépaisseurs adjacentes correspondent aux mesures entre les extrémités et le milieu de chaque plot.

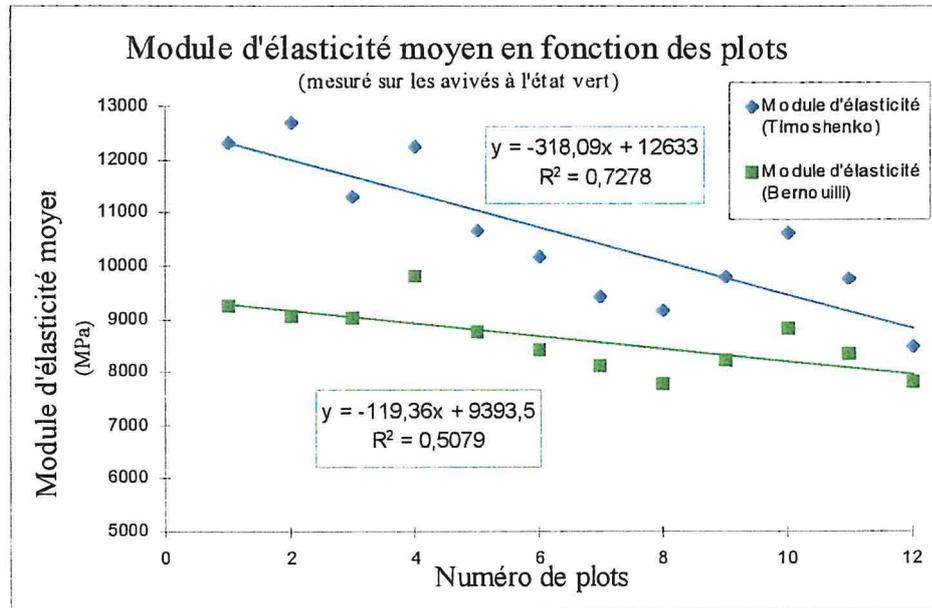


Ces deux graphes représentent la surépaisseur des plots; c'est à dire la différence entre l'épaisseur souhaitée (20 mm) et réglée sur la scie de tête et la mesure effective de l'épaisseur sur l'avivé. Quel que soit le mode de sciage, la surépaisseur a un comportement différent selon que l'on se trouve à une extrémité de la planche ou vers le milieu. Les extrémités des plots ont des épaisseurs voisines voir inférieures au 20 mm fixé. Couplé au phénomène de bord, le tronçonnage a libéré une quantité importante de contraintes. De plus, lorsqu'on prélève un plot dans une grume, on libère des contraintes; le champs de contrainte de la grume est modifié; la grume se déforme et s'incurve sur le chariot. La face découverte de la grume n'est plus dans le plan de coupe de la lame. En fin de sciage, les surépaisseurs suivent à peu de choses près les mêmes variations.

La libération totale des contraintes en fin de sciage a pour conséquence une limitation des effets du retrait tangentiel et radial. Ainsi, les derniers avivés ont une épaisseur à peu près constante.

IV.5 Modules d'élasticité des avivés

Il a été effectué 133 mesures de module d'élasticité en flexion à l'aide de la méthode B.I.N.G. La valeur du module est ensuite moyennée en fonction du numéro de plot. La méthode B.I.N.G. permet de déterminer le module d'élasticité suivant deux méthodes d'approches. Le modèle de Bernouilli est une méthode simple applicable surtout pour les poutres élancées. Le modèle de Timoshenko permet d'avoir une indication plus précise du module. Le coefficient de détermination R^2 est plus élevé que par l'approximation de Bernouilli. De plus le modèle de Timoshenko donne le module de cisaillement.



Les avivés ne sont pas classés en fonction de leur mode de débit. Le graphe précédent regroupe toutes les mesures de modules. Le module d'élasticité longitudinal diminue en fonction de l'avancement du sciage. Les planches proches du coeur ont une rigidité à la flexion plus faible. La baisse de la densité en fonction du rayon explique en partie cette diminution du module d'élasticité. La formule de la régression du module d'élasticité sera directement intégrée au programme de modélisation des déformations de sciage.

IV.6 Relations entre DRLM et déformations de sciage

IV.6.1 Passage des valeurs des DRLM aux contraintes de croissance

La mesure des déformations longitudinales de maturations n'est rien d'autre qu'une variation de distance $\Delta\delta$ due au perçage d'un trou central de diamètre $d=20$ mm entre deux pointes distantes de $D = 45$ mm avant le perçage. Les travaux effectués par ARCHER (1986) et par FOURNIER (1989) ont montré que la variation de cette distance $\Delta\delta$ dépend de l'anisotropie élastique de l'essence étudiée et de la géométrie du capteur.

La relation liant le déplacement des pointes à la contrainte est la suivante.

$$\frac{\Delta\delta}{D} = \frac{1}{E_L} (\psi_L\sigma_{LL} + \psi_T\sigma_{TT})$$

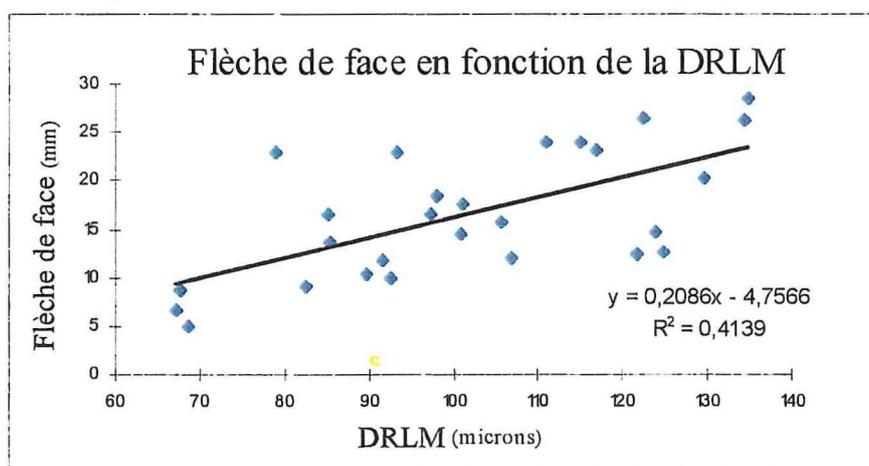
On suppose que $\sigma_{TT} \ll \sigma_{LL}$, l'équation devient: $\frac{\Delta\delta}{D} = \frac{1}{E_L} (\psi_L\sigma_{LL})$

$$\text{or } \sigma_{LL} = -\alpha_L \times E_L \quad \text{d'où } \alpha_L = -K \times \Delta\delta \text{ avec } K = \frac{1}{D \psi_L}$$

Par soucis de simplification des formules, on peut négliger la contribution de la contrainte tangentielle qui est 10 fois plus petite que la contrainte longitudinale. D'ailleurs, la modélisation du champs de contrainte ne prendra pas en compte cette composante tangentielle. Les constantes adimensionnelles ψ_L et ψ_T dépendent de la forme du capteur (c'est à dire du rapport d/D) et des coefficients élastiques dans le plan LT (E_T/E_L , G_{LT}/E_L , $1/\nu_{LT}$). Un programme informatique permet d'avoir tout les coefficients K en entrant comme variables la densité et l'humidité relative du bois.

IV.6.2 Relation entre DRLM et déformations de sciage

La partie «Modélisation du champ de contraintes de la grume» sera réalisée ultérieurement par l' INRA de Nancy et le LRBB. N'ayant que les valeurs des contraintes à la périphérie, je n'ai pu effectuer de corrélation DRLM / déformations de sciage que pour les deux premiers débits de chaque grume. L'étude des relations DRLM/déformations de sciage sur la totalité des plots de la grume s'avérait trop hasardeuse faute de renseignements précis sur l'état de contrainte général de la grume. Cependant, les données des DRLM ont permis de dégager plusieurs tendances sur les relations entre contraintes de croissance et déformation au sciage. Certaines déformations comme la flèche de face semblent être directement relié aux contraintes dans l'arbre. L'importance de ces défauts est proportionnelle au valeurs de contrainte. Les flèches de face importantes sont rencontrées en début de sciage; or la distribution de contrainte montre que c'est à la périphérie des arbres que les contraintes de croissance sont les plus élevées. Le graphique suivant exprime la variation de la flèche de face en fonction de la DRLM. Les valeurs des flèches de face sont celles des deux premiers plots (tout débit confondus).



Pour les flèches de rive, on observe le phénomène inverse. Bien que la méthode de mesure ne soit pas à 100% fiable (surtout au niveau de l'orientation des plots sur le banc de mesure), les flèches de rive augmentent (en valeur absolue) au fur et à mesure du sciage et ce malgré la baisse de l'état de contrainte de la grume.

La flèche de rive n'apparaissant que vers la fin du débit, il est difficile de la corrélérer avec les contraintes périphériques. Cette corrélation est d'autant plus difficile que les valeurs initiales des DRLM n'ont plus rien à voir avec l'état de contrainte de la grume en fin de sciage.

Concernant le tuilage et le gauchissement, il semblerait que l'incidence du mode de débit sur ces déformations soit plus importante que l'état de contrainte général de la grume. L'évolution de ces deux grandeurs en fonction de l'avancement du débit a montré une certaine symétrie cylindrique. Une fois la moelle dépassée, on observe un changement de signe pour le gauchissement et un changement de courbure pour le tuilage. Pour autant, il ne faut pas négliger les effets de la libération et de la modification du champ de contrainte. Les valeurs trouvées en fin de débit (en valeur absolu) sont inférieures à celle rencontrées au début du sciage. Cette différence est due en grande partie à la libération des contraintes.

IV.6.3 Modélisation des déformations

La simulation et la modélisation des déformations longitudinales induites par les contraintes de croissance ont été réalisées par Jean Philippe COSTES, étudiant en DEA de Mécanique à l'université de Montpellier II. Ce travail a pour but de développer un outil simple (à une dimension) complémentaire des méthodes numériques plus complexes (2D et 3D) développées ultérieurement dans le cadre de SiCroDef. Il ne permet que la simulation des retraits longitudinaux et des courbures. En cours d'élaboration, la modélisation des déformations n'est pas totalement terminée. Elle est basée sur la redistribution des contraintes tout au long du sciage. Elle prend en compte plusieurs hypothèses et tient compte de la déformation de la grume sur le chariot. Pour comprendre cette redistribution des contraintes, nous avons développé les calculs pour les deux premiers débits. Les détails de la modélisation effectuée par M. COSTES se trouvent en annexe 5.

Pour la modélisation, on suppose l'état initial de contrainte de la grume connu (modèle asymétrique et linéaire sur le rayon). Soit $\sigma^{(0)}$ cet état de contrainte initial. Ce champ de contrainte s'exprime de la manière suivante:

$$\sigma^{(0)} = \sigma_*^{(0)} \left(1 + 3 \frac{r - R}{R} \right)$$

avec $\sigma_*^{(0)}$ qui est directement déduit de la valeur de la DRLM à la périphérie

Lorsqu'on procède à la première coupe, l'état de contrainte de la grume devient $\sigma^{(1)}$:

$$\sigma^{(1)} = \sigma^{(0)} + \Delta\sigma^{(1)}$$

où $\Delta\sigma^{(1)}$ est le supplément de contrainte entre l'état initial et la première coupe. Or d'après la loi de Hooke, on a $\Delta\sigma^{(1)} = E \cdot \Delta\varepsilon^{(1)}$ et $\Delta\varepsilon^{(1)} = -a^{(1)} \cdot [x - X^{(1)}]$ avec $a^{(1)}$ qui représente la courbure de la grume après le premier sciage et $X^{(1)}$ l'axe neutre de la grume après le premier sciage.

On a donc pour la grume (1) après sciage:

$$\sigma^{(1)} = \sigma^{(0)} - a^{(1)} \cdot [x - X^{(1)}] \quad \text{sur la section de la grume}$$

On procède maintenant à une deuxième coupe. On peut écrire la contrainte $\delta\sigma^{(2)}$ due à cette 2^{ème} coupe pour la grume et le deuxième débit

$$\sigma^{(2)} = \sigma^{(1)} + \delta\sigma^{(2)}$$

d'après la loi de Hooke, on a: $\sigma^{(2)} = \sigma^{(1)} + E.\delta\epsilon^{(2)}$

avec $\delta\epsilon^{(2)}$, la déformation associée à la contrainte $\delta\sigma^{(2)}$

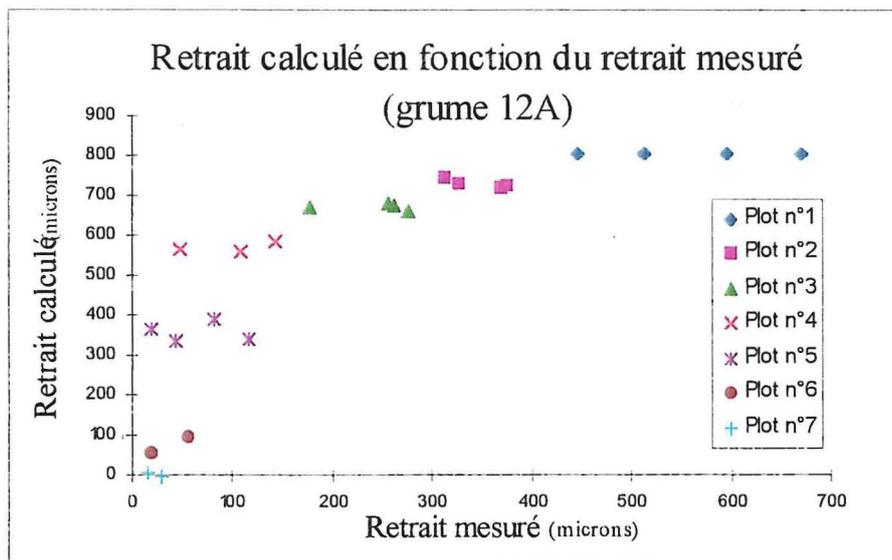
Par récurrence, on a aussi:

$\delta\epsilon^{(2)} = -\delta a^{(2)}.(x-x^{(2)})$ où $\delta a^{(2)}$ est la courbure et $x^{(2)}$ l'axe-neutre associé à cette nouvelle déformation dû au sciage du deuxième plot.

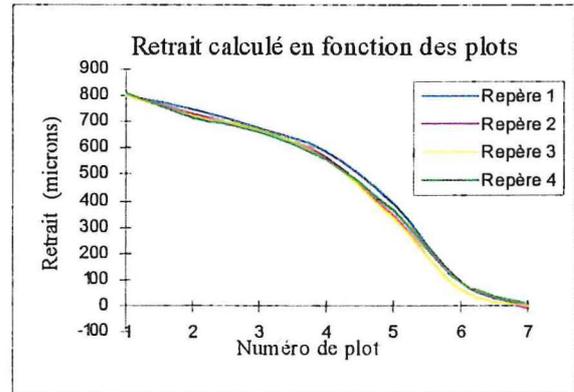
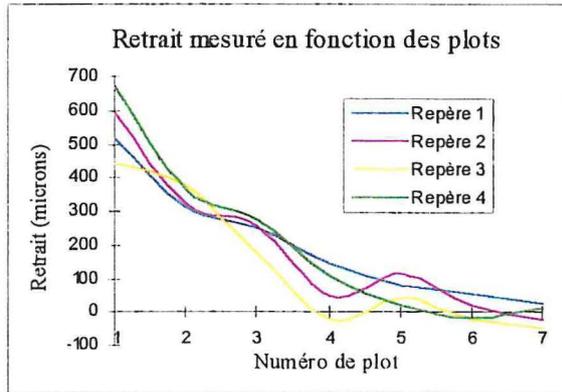
Le nouvel état de contrainte est donc:

$$\sigma^{(2)} = \sigma^{(0)} - E.a^{(1)}.(x - X^{(1)}) - E.\delta a^{(2)}.(x - x^{(2)})$$

De cette redistribution des contraintes à chaque opération de sciage, on pourra déduire le retrait longitudinal, la flèche de face de chaque débit et sa courbure. Les résultats partiels recueillis concernent la détermination du retrait longitudinal pour la grume 12A. Cette grume a été débitée en plot sans procéder à des retournements. Elle a été choisie en raison de l'homogénéité relative des DRLM sur sa périphérie. Le graphe suivant décrit l'évolution du retrait longitudinal modélisé en fonction du retrait mesuré sur les plots.



La série de quatre points que l'on retrouve pour chaque plot correspond à la mesure des retraits sur les quatre portions de la grume. La modélisation permet de retrouver la régression du retrait longitudinal en fonction de l'avancement du sciage. Les retraits calculés sont d'une manière générale supérieurs aux retraits constatés sur les plots. La modélisation semble être correcte pour les quatre premiers débits (à un facteur multiplicatif près). Le retrait des derniers débits semblent être plus difficile à déterminer. Lorsqu'on compare la régression du retrait calculé et la régression du retrait mesuré, on observe une diminution plus rapide pour le cas réel que pour le cas théorique. La modélisation ne semble pas tenir suffisamment compte de la libération des contraintes.



Cette modélisation ne peut pas refléter exactement les effets de la libération des contraintes lors du sciage et ce pour des raisons de variabilité des propriétés mécaniques au sein d'un même plot. Bien que les valeurs numériques trouvées par le programme ne soient pas toujours conformes à la réalité, cette modélisation a l'avantage de déterminer les grandes tendances de déformations.

Conclusion

La libération des contraintes de croissance a des effets néfastes sur la qualité des sciages et le rendement matière. Pour certaines essences comme l'eucalyptus, ces conséquences sont inéluctables. Il existe pourtant des moyens de limiter ses effets. C'est le travail qu'il m'a été demandé de réaliser pendant ce stage de fin d'étude. J'ai pu pendant ces cinq mois observer et analyser l'incidence des contraintes de croissance et du mode de débit sur la qualité des sciages. Le relâchement des efforts ne se fait de la même manière suivant que l'on débite la grume en plot, sur noyau, ou selon un autre mode de débit. Les déformations de sciages (flèches de face, flèche de rive, tuilage, gauchissement) constatées sur le débit en plot sont plus importantes que celles observées lors du débit sur noyau. Ce mode de sciage a l'avantage de relâcher les contraintes plus rapidement. Ces efforts sont libérés sur les trois ou quatre premiers plots; ainsi les sciages ultérieurs sont moins affectés par les déformations. Le sciage en plot est à proscrire pour les essences à croissance rapide. Les Déformations Résiduelles Longitudinales de Maturation sont à la base de la modélisation du champ de contrainte de la grume et des déformations. Elles constituent une bonne estimation du champ périphérique. Cependant le passage des DRLM au champ de contrainte au moyen de modèles théoriques (modèle de KUBLER ou de FOURNIER) ne tient pas compte de la variabilité des propriétés physico-mécanique du bois. De plus, les hypothèses pour la modélisation du champ de contrainte et des déformations ne reflètent pas toujours la réalité. Bien que des tendances générales aient été déterminées, il devient difficile de caractériser précisément les déformations que l'on va obtenir après le sciage.

Pour augmenter les domaines d'utilisation de ces essences à fortes contraintes de croissance, il faudrait agir:

- en amont: par la sélection d'hybride et de clone ayant des contraintes internes moins fortes et par l'application d'une sylviculture appropriée à ce type d'essence.
- en aval: par la détermination du champ de contrainte avant et pendant les opérations de première transformation afin d'adapter les méthodes de sciages et les modes de débit.

Bibliographie

- BAILLERES H., 1994: **Précontraintes de croissance et propriétés mécano-physiques de clones d'Eucalyptus (Pointe Noire-Congo): hétérogénéités, corrélations et interprétations histologiques.** Thèse de Doctorat en sciences du bois, Université de Bordeaux I
- BAILLERES H., CHANSON B., FOURNIER M., TOLLIER M.T., MONTIES B., 1993: **Structure, composition chimique et retrait de maturation du bois chez les clones d'eucalyptus.** 6^{ième} Séminaire interne. Architecture, Structure et Mécanique de l'Arbre, p90-119, Montpellier.
- BEDEL J., THIEL J., 1972: **Comportement au sciage de l'Eucalyptus Grandis et l'Eucalyptus Cloeziana.** Ouvrage GERDAT-CTFT
- BEKELE T., 1995: **Degradation of boards of Eucalyptus Globulus and Eucalyptus Camaldulensis during air drying.** Holz als Roh- und Werkstoff, n°53, p 407-412.
- CHARDIN A., 1980: **Les contraintes de croissance du WAPA. Etude en vue de déterminer les conditions technologiques d'utilisations du WAPA, principale essence de Guyane.** Compte-rendu de fin d'étude; CTFT, Nogent sur Marne.
- CHARDIN A., SALES C., 1983: **Species developing a high level of growth stresses: a method of measure and its possible use to study the consequence on wood quality.** IUFRO World Congress, Madison (USA).
- CHARDIN A. SALES C., 1984: **Etude des espèces à fortes contraintes de croissance de la forêt naturelle de Guyane.** IUFRO MANAUS, GERDAT-CTFT, Nogent sur Marne.
- CLARKE S.H., 1939: **Stresses and Strains in growing Timber.** Forest Products Research Labotary, U.S. Department of Agriculture, Vol. 13, n°1
- COMBES J.G., 1995: **Etude des relations entre morphologie de l'arbre et propriétés mécaniques, physiques et chimiques du bois chez le Pin Maritime.** 8^{ième} Séminaire interne. Architecture, Structure et Mécanique de l'Arbre, p 157-176, Montpellier.
- FOURNIER-DJIMBI M., 1989: **Déformations de maturation, contraintes de croissance dans l'arbre sur pied, réorientation et stabilité des tiges.** 1^{er} Séminaire interne. Architecture, Structure et Mécanique de l'Arbre, p 85-93, Montpellier.
- GERARD J., 1994: **Contraintes de croissance, variations internes de densité et module d'élasticité longitudinal, et déformations de sciage chez les eucalyptus de plantation.** Thèse de Doctorat en sciences du bois, Université de Bordeaux I.
- GERARD J., 1992: **Fentes d'abattage et déformations de sciage dues à la libération des contraintes de croissance.** 5^{ième} Séminaire interne. Architecture, Structure et Mécanique de l'Arbre, Montpellier.
- GERARD J., GARNIER E., FLORENCHIE P., FOURNIER M., 1991: **Déformations de sciages d'eucalyptus liées aux contraintes de maturation.** 3^{ième} Séminaire interne. Architecture, Structure et Mécanique de l'Arbre, p 139-151, Montpellier.
- GUENEAU P., 1973: **Contraintes de croissance.** Cahiers Scientifiques n°3, CTFT, p 52.

- HALLOCK H., 1965: **Sawing to reduce warp of loblolly pine studs.** Forest Products Research Laboratory, U.S Department of Agriculture, n°51.
- HILLIS W.E., BROWN A.G., 1978: **Eucalyptus for wood production.** CSIRO Australie, p277-281, p322-327, p329-330, p332-333.
- MAEGLIN R.R., BOONE S.R., 1986: **Increased Stud Grade Yield of plantation southern pine by S.D.R.** Forest Products Labotary, Madison (USA)
- MAEGLIN R.R., BOONE S.R., 1988: **Saw-Dry-Rip improves quality of Random-Length Yellow-Poplar 2 by 4's.** Forest Products Labotary, Madison (USA)
- MILOTA M.R., 1991: **Method for measurement of bow and crook.** Forest Products Journal, Vol. 41, n°9
- PANDEY D., 1992: **Assement of Tropical Forest Plantation Resource.** Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Survey; p 141
- PAYA J.M., 1987: **Contribution à l'analyse des corrélations entre niveau de contraintes de croissance et qualité des grumes après abattage sur le WAPA.** Division technologique, CTFT-GUYANNE.

Annexes

Page 52: Annexe 1

- ◆ Détermination du coefficient K.

Page 53: Annexe 2

- ◆ Valeurs des DRLM des 16 grumes d'Eucalyptus et illustrations graphiques.

Page 56: Annexe 3

- ◆ Valeurs des retraits longitudinaux et des courbures.

Page 57: Annexe 4

- ◆ Valeurs des déformations de sciage (flèche de face, flèche de rive, tuilage, gauchissement, surépaisseur)

Page 60: Annexe 5

- ◆ Détails des calculs pour la modélisation et la redistribution des contraintes lors du sciage d'une grume (J.P. COSTES)

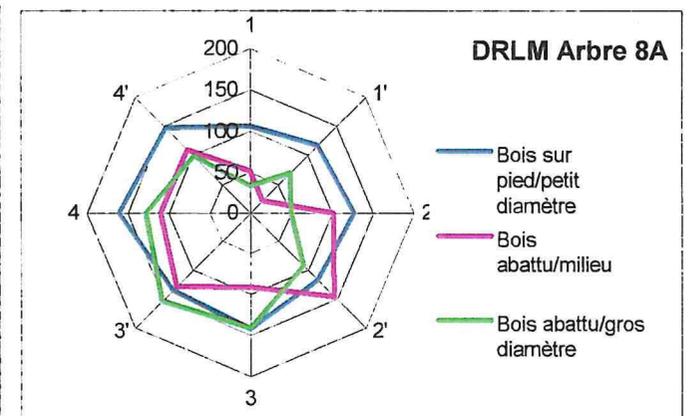
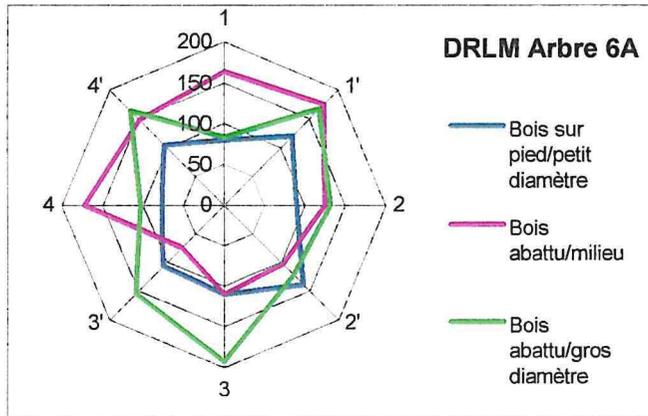
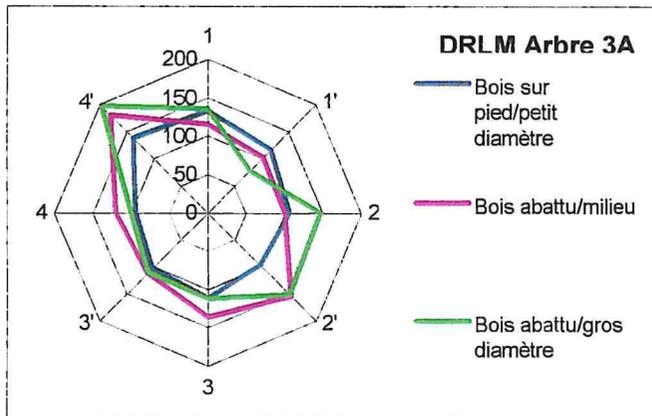
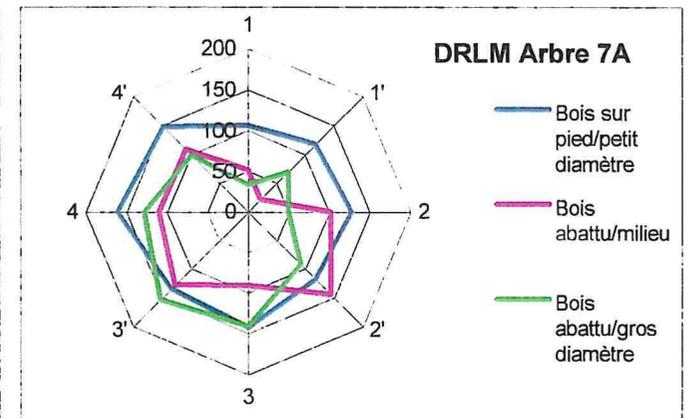
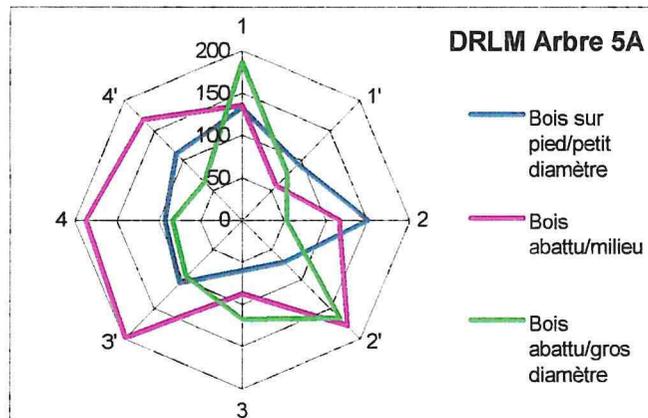
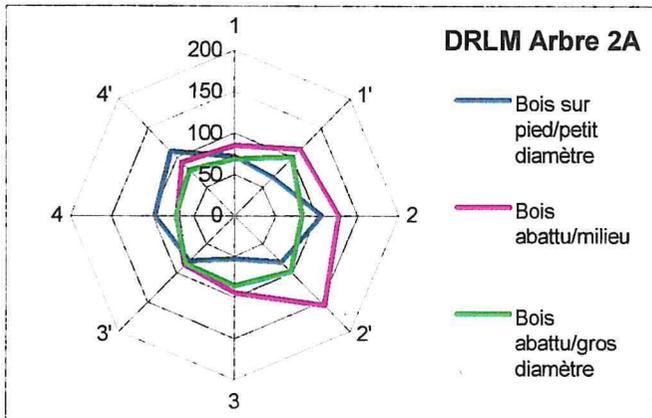
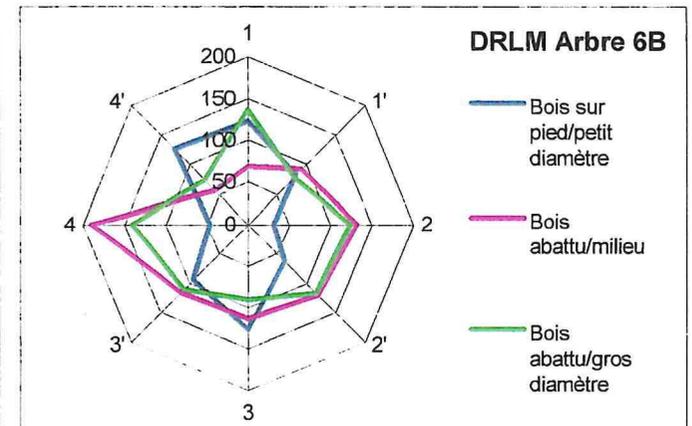
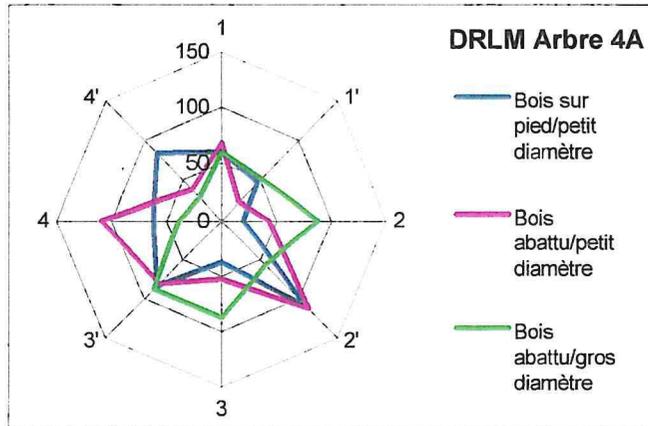
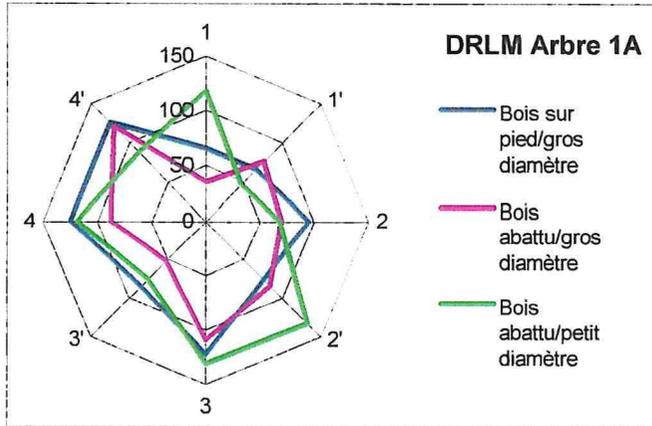
Annexe 1

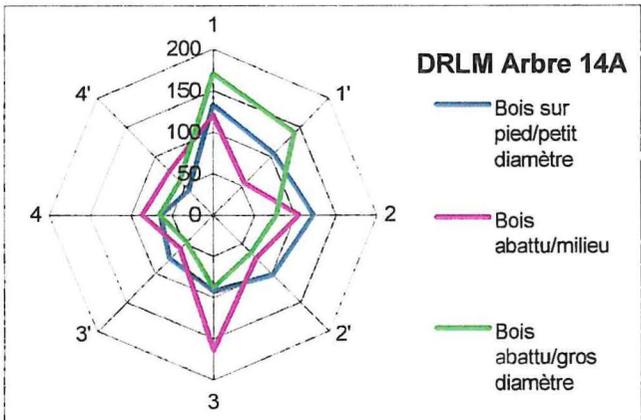
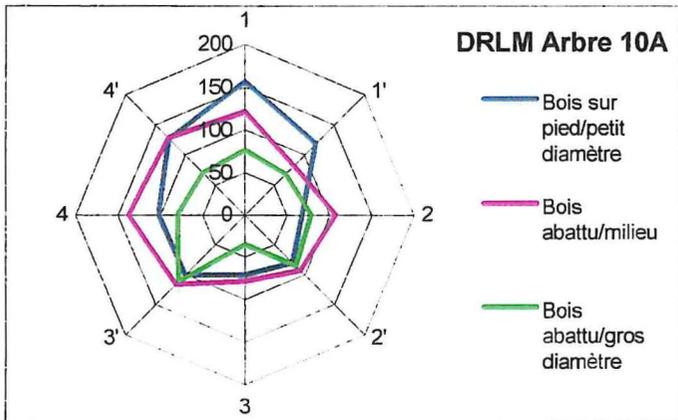
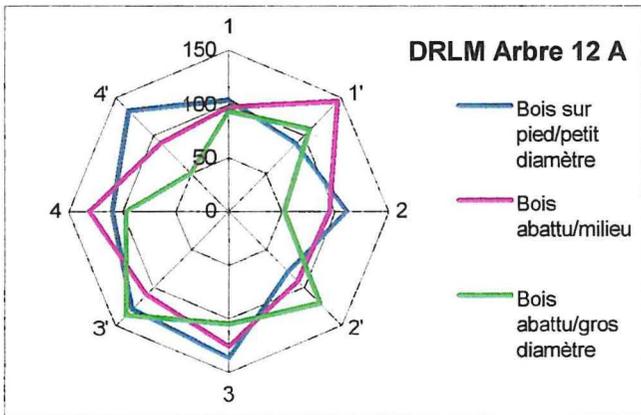
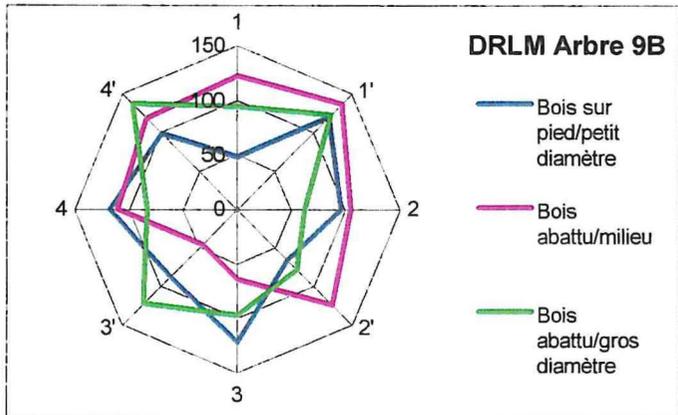
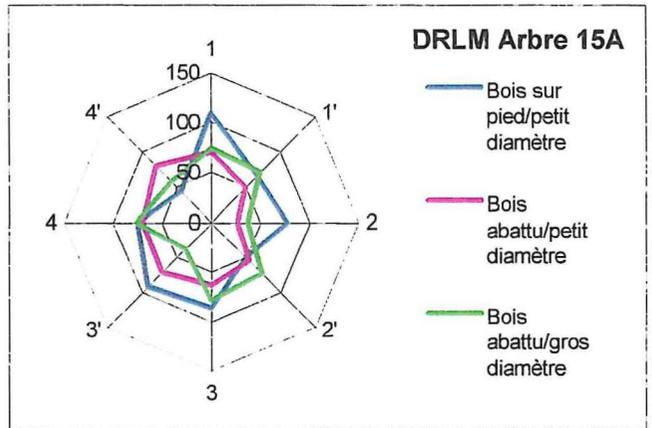
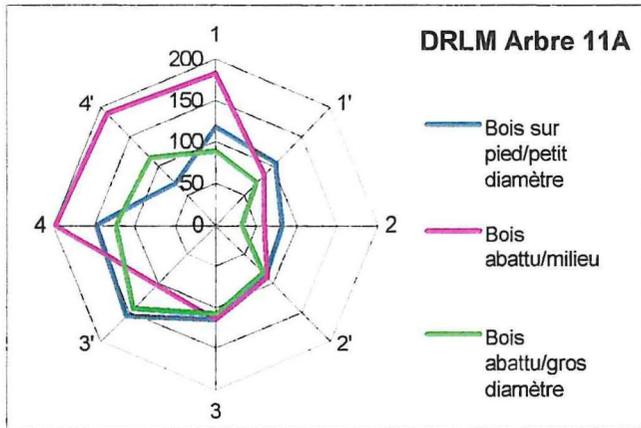
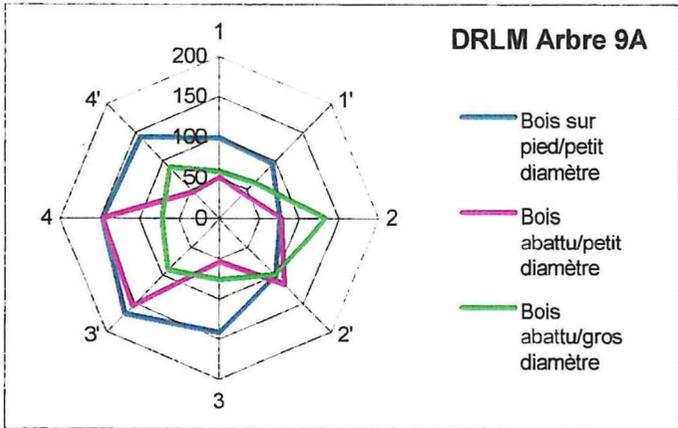
Détermination du coefficient K (en m^{-1} ou en $\mu def/\mu m$) de passage entre le déplacement mesuré par la méthode du trou unique et la DRLM

Essences	Densité à 12%	E_L	E_T	G_{TL}	S^{-1}_{23}	E_T / E_L	G_{TL} / E_L	S^{-1}_{23} / E_L	K
Feuillus standard	0.65	11600	500	600	-24000	0.043	0.052	-2.08	12.1
	0.4	7100	200	300	-14000	0.028	0.042	-1.97	10.6
	0.9	16300	800	900	-35000	0.049	0.055	-2.15	12.6
Eucalyptus congolais	0.71	13000	600	700	-27000	0.046	0.054	-2.08	12.4
<i>Xylopia pegreou</i>	0.71	12000	800	800	-30000	0.066	0.066	-2.46	14
<i>Fraxinus sp.</i>	0.8	13500	700	800	-27000	0.052	0.059	-2	13.1
<i>Quercus sp.</i>	0.73	14000	500	400	-20000	0.036	0.029	-1.42	9.1
<i>Fagus sylvatica</i>	0.74	11500	500	700	-21000	0.043	0.061	-1.83	13
<i>Populus tremuloides</i>	0.3	6500	120	300	-20000	0.018	0.046	-3.08	10.5
<i>Eperua falcata</i>	0.85	15000	500	500	-39000	0.033	0.033	-2.6	9.7
<i>Peltogyne venosa (amarante)</i>	0.8	16500	900	800	-40000	0.055	0.048	-2.42	12
<i>Terminalia superba (limba)</i>	0.55	9000	550	600	-20000	0.061	0.067	-2.22	14
<i>Simaruba amara (marupa)</i>	0.42	5800	350	450	-13000	0.06	0.078	-2.24	14.9
<i>Liriodendron tulipifera</i>	0.54	14000	350	600	-34000	0.025	0.049	-2.43	10.5
<i>Distemonanthus benthamianus (movingui)</i>	0.76	13000	800	800	-60000	0.061	0.061	-4.61	13.4
<i>Ceiba pentandra (fromager)</i>	0.34	2600	100	100	-5600	0.038	0.038	-2.15	10.5

Mesure des DRLM sur les Eucalyptus Gundal

	Diamètre médian	Type de mesure	1	1'	2	2'	3	3'	4	4'
Arbre 1a	23,23	Bois sur pied/gros diamètre	65	65	95	75	122	85	125	125
		Bois abattu/gros diamètre	35	75	70	84	109	52	88	120
		Bois abattu/petit diamètre	118	46	68	132	131	75	119	87
Arbre 2a	26,1	Bois sur pied/petit diamètre	71	65	106	81	53	79	97	110
		Bois abattu/milieu	85	113	127	155	95	86	70	91
		Bois abattu/gros diamètre	68	100	82	97	86	84	71	78
Arbre 3a	22,3	Bois sur pied/petit diamètre	133	116	107	96	111	102	94	138
		Bois abattu/milieu	115	102	101	153	136	112	120	180
		Bois abattu/gros diamètre	135	77	147	151	112	111	100	197
Arbre 4a	28,6	Bois sur pied/petit diamètre	60	46	20	109	38	83	62	83
		Bois abattu/petit diamètre	68	22	43	113	53	81	110	38
		Bois abattu/gros diamètre	60	51	88	57	88	87	39	28
Arbre 5a	22,6	Bois sur pied/petit diamètre	132	94	150	71	60	105	92	111
		Bois abattu/milieu	135	57	116	179	88	198	187	167
		Bois abattu/gros diamètre	186	76	53	165	118	95	83	64
Arbre 6a	25,1	Bois sur pied/petit diamètre	80	120	90	138	110	107	77	104
		Bois abattu/petit diamètre	174	105	101	116	111	104	118	105
		Bois abattu/milieu	164	175	125	103	110	74	172	148
		Bois abattu/gros diamètre	83	167	132	122	193	154	103	164
Arbre 6b	20,6	Bois sur pied/petit diamètre	122	81	31	63	127	93	46	125
		Bois abattu/milieu	68	92	132	120	114	116	191	56
		Bois abattu/gros diamètre	136	78	124	117	90	110	141	74
Arbre 7a	22	Bois sur pied/petit diamètre	114	105	123	127	88	121	142	177
		Bois abattu/milieu	48	70	58	110	88	154	76	130
		Bois abattu/gros diamètre	81	70	89	120	102	85	45	97
Arbre 8a	21	Bois sur pied/petit diamètre	106	117	127	117	142	134	161	147
		Bois abattu/milieu	51	21	101	145	91	127	110	108
		Bois abattu/gros diamètre	33	69	50	92	141	153	128	98
Arbre 9a	26,4	Bois sur pied/petit diamètre	98	95	77	101	142	168	147	140
		Bois abattu/petit diamètre	50	43	78	116	54	154	147	45
		Bois abattu/gros diamètre	57	62	133	99	77	91	72	88
Arbre 9b	21,3	Bois sur pied/petit diamètre	48	120	96	66	122	87	118	98
		Bois abattu/milieu	123	137	105	124	64	45	111	118
		Bois abattu/gros diamètre	94	122	62	78	97	123	83	137
Arbre 10a	25,7	Bois sur pied/petit diamètre	157	119	68	79	71	100	102	127
		Bois abattu/milieu	121	82	107	93	78	116	138	128
		Bois abattu/gros diamètre	76	68	78	85	35	111	80	70
Arbre 11a	23,23	Bois sur pied/petit diamètre	117	105	82	88	115	156	147	70
		Bois abattu/milieu	183	85	60	90	115	103	198	190
		Bois abattu/gros diamètre	88	72	32	82	108	144	123	113
Arbre 12a	22,9	Bois sur pied/petit diamètre	104	89	111	79	137	128	109	132
		Bois abattu/milieu	97	145	95	92	126	110	131	90
		Bois abattu/gros diamètre	93	108	52	121	105	136	96	50
Arbre 14a	23,5	Bois sur pied/petit diamètre	133	105	123	103	93	75	64	42
		Bois abattu/milieu	120	54	105	74	164	57	87	75
		Bois abattu/gros diamètre	170	140	77	65	88	47	66	58
Arbre 15a	24,5	Bois sur pied/petit diamètre	109	66	77	50	86	91	75	43
		Bois abattu/petit diamètre	70	49	27	55	63	71	70	79
		Bois abattu/gros diamètre	74	70	37	73	78	38	76	57





Annexe 3

Retrait longitudinal en microns (débit sur noyau)

Plot	arbre 1a				arbre 2a				arbre 4a				arbre 6a				arbre 9a				arbre 10a				arbre 14a				arbre 15a				
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
n°1	540	466	425	508	423	288	268	425	612	576	743	408	486	363	478	573	430	408	418	395	459	383	480	256	390	353	228	378	455	245	423	393	
n°2	435	390	407	410	418	355	463	468	653	539	616	563	408	298	325	215	335	130	57,5	318	436	424	441	466	373	253	323	303	133	185	298	273	
n°3	541	663	640	604	400	590	648	420	42,5	77,5	250	-23	370	235	170	295	630	650	720	713	147	215	243	138	523	491	581	638	390	493	470	413	
n°4	670	681	694	720	478	540	475	425	188	295	234	118	228	203	160	283	618	600	589	688	215	212	172	130	209	248	273	263	540	515	568	603	
n°5	526	509	605	651	495	515	510	523	599	542	844	630	663	828	858	905	493	610	540	575	679	563	609	609	403	305	310	490	610	478	385	500	
n°6	537	257	339	464	410	435	440	523	544	548	685	705	683	855	830	785	325	353	368	385	528	369	370	513	361	293	268	230	398	295	233	393	
n°7	219	-40	77,5	251	288	128	218	333	450	323	523	647	710	658	590	603	113	153	160	260	331	131	47,5	227	260	209	198	208	233	-5	87,5	92,5	
n°8	32,5	-133	-57	78,5	105	-45	40	150	403	80	200	619	545	585	390	393	7,5	-40	-20	98,5	96,5	-50	-73	11	57,5	52,5	-7,5	10	130	-142	-190	32,5	
n°9	10	-103	-15	-85	15	-70	-95	77,5	-10	284	-2,5	-300	290	200	20	125	-85	-103	75	5	-128	21,5	-80	-132	-30	-63	-33	42,5	181	-74	-30	38	
n°10					30	-20	-90	42,5	-58	-55	-14	-400	130	-40	2,5	32,5					-138	-78	-130	-160									
n°11									55,5	143	0	105	32,5	-53	-68	-18																	
n°12									-12	-23	17,5	-55																					

Retrait longitudinal en microns (débit en plot)

Plot	arbre 3a				arbre 5a				arbre 7a				arbre 8a				arbre 11a				arbre 12a				arbre 6B				arbre 9B			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
n°1	525	568	465	558	308	315	303	330	298	368	228	518	458	578	492	643	425	440	348	590	513	595	445	670	565	430	500	493	308	230	333	348
n°2	225	358	311	373	475	458	485	448	235	156	220	450	353	443	398	483	303	77,5	92,5	245	311	327	375	368	255	313	252	356	395	368	368	498
n°3	268	231	137	255	310	70	210	153	188	100	7,5	55	198	140	113	240	210	115	135	188	255	260	175	275	233	225	128	125	183	100	82,5	168
n°4	125	158	22,5	158	220	175	188	143	85,5	82,5	17,5	103	188	164	110	166	133	23	27	12,5	143	47,5	-25	108	112	164	154	128	185	105	158	165
n°5	138	3	2,5	11	30,5	77,5	55	52,5	125	-18	40	39	60	57	85	72,5	75	29,5	-108	-0,5	80,5	116	43	19	113	85	-7,5	65	-23	72,5	-28	12,5
n°6	58	-114	-28	63,5	67,5	-76	-73	5	8,5	-7	0	-38	32,5	12,5	-55	40	45,5	8,5	-42	48	55	17,5	-20	-17	55	-25	-1	35	130	-7,5	-98	45
n°7	2,5	-10	33	39	7,5	-22	-17	14,5	-25	-2,5	30	12,5	22,5	-20	-13	65,5	-20	1,5	-63	32,5	27,5	-21	-48	15	42,5	-33	-36	54,5	0	45,5	-43	27,5

Flèche sur 50cm avant et après sciage (mm); Variation de flèche (mm)

Plot		Arbre 3a				Arbre 7a				Arbre 8a				Arbre 12 a				Arbre 6b				Arbre 9b				Arbre 14a			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
n°1	Flèche avant sciage	0,63	0,04	-0,21	0,06	0,65	-0,35	-0,15	-0,05	0,6	-0,3	0,21	0,36	0,52	0,01	0,05	-0,19	0,71	0,38	0,06	-0,15	1,01	-0,48	-0,15	-0,15	0,58	-0,08	-0,2	0,2
	Flèche après sciage	-0,63	-1,28	-1,18	-1,07	-0,22	-1,04	-0,65	-0,91	-0,17	-1,53	-1,02	-1,07	-0,58	-1,47	-1,25	-1,47	-0,77	-0,65	-1,03	-1,01	0,54	-0,9	-0,41	-0,8	0,12	-0,63	-0,65	-0,53
	Différence de flèche	1,26	1,33	0,97	1,13	0,87	0,69	0,5	0,88	0,77	1,23	1,24	1,43	1,1	1,49	1,31	1,28	1,48	1,03	1,09	0,86	0,47	0,41	0,25	0,45	0,47	0,57	0,45	0,73
n°2	Flèche avant sciage	0,61	-0,12	-0,07	0,03	0,71	-0,11	0,05	-0,15	0,77	-0,05	-0,01	-0,09	0,72	-0,13	-0,01	-0,04	0,3	-0,13	-0,13	-0,23	0,45	-0,27	0,06	0,03	0,64	0,14	0,05	-0,04
	Flèche après sciage	0,02	-1,07	-1,24	-0,64	-0,21	-0,37	-0,75	-1,3	0,24	-0,54	-0,83	-1,46	-0	-0,54	-0,25	-0,65	-0,22	-0,74	-0,63	-0,78	-0,92	-1,14	-1,19	-0,8	-0,14	-0,67	-0,88	-0,75
	Différence de flèche	0,59	0,95	1,17	0,67	0,93	0,28	0,8	1,15	0,52	0,5	0,82	1,37	0,72	0,41	0,24	0,62	0,53	0,61	0,5	0,55	1,37	0,87	1,24	0,84	0,78	0,81	0,93	0,71
n°3	Flèche avant sciage	0,36	-0,22	-0,22	-0,21	0,52	-0,3	-0,06	-0,39	0,75	-0,33	-0,36	-0,33	0,9	0,02	0,19	0,03	0,3	-0,16	-0,14	-0,06	0,41	-0,3	-0,45	-0,24	0,72	-0,09	-0,11	-0,18
	Flèche après sciage	-0,41	-1,13	-0,83	-0,86	0,18	-0,46	-0,09	-0,4	0,34	-0,68	-0,49	-0,88	0,27	-0,97	-0,17	-0,53	-0,24	-0,69	-0,58	-0,15	-0,02	-0,49	-0,84	-0,88	0,35	-0,55	-0,35	-0,94
	Différence de flèche	0,77	0,92	0,61	0,64	0,34	0,17	0,03	0,01	0,42	0,36	0,13	0,55	0,63	0,99	0,36	0,58	0,54	0,53	0,44	0,1	0,43	0,18	0,2	0,65	0,38	0,46	0,24	0,76
n°4	Flèche avant sciage	0,48	-0,49	-0,66	-0,36	0,4	-0,13	-0,39	-0,28	0,66	0,07	-0,26	-0,22	0,76	-0,23	0,06	-0	0,4	-0,55	-0,3	-0,07	-0,18	-0,39	-0,38	-0,13	0,54	0,12	-0,1	-0,08
	Flèche après sciage	0,14	-1,08	-0,63	-0,62	0,23	-0,5	-0,43	-0,74	0,37	-0,47	-0,64	-0,81	0,58	-0,22	0,1	-0,26	-0,23	-1,02	-0,95	-0,5	-0,71	-0,7	-1,38	-0,61	0,14	-0,33	-0,27	-0,25
	Différence de flèche	0,34	0,59	-0,02	0,26	0,17	0,37	0,04	0,46	0,29	0,53	0,38	0,39	0,18	-0,01	-0,05	0,26	0,83	0,47	0,65	0,42	0,53	0,31	0,99	0,49	0,4	0,44	0,17	0,17
n°5	Flèche avant sciage	0,38	-0,37	-0,07	-0,08	0,57	-0,24	-0,17	0,05	0,53	-0,23	-0,24	-0,26	0,58	-0,48	0,12	0,01	0,92	-0,46	-0,13	-0,03	0,83	-0,43	-0,19	-0,57	0,69	-0,13	-0,3	-0,07
	Flèche après sciage	0,01	-0,42	-0,06	-0,14	0,11	-0,23	-0,89	-0,19	0,37	-0,42	-0,32	-0,6	0,12	-1,04	-0,6	0,05	0,57	-0,85	-0,13	-0,2	0,34	-0,82	-0,24	-0,68	-0,05	-0,78	-0,89	-1,32
	Différence de flèche	0,35	0,05	-0,01	0,06	0,46	-0,02	0,52	0,24	0,17	0,19	0,08	0,34	0,45	0,57	0,72	-0,05	0,35	0,4	-0	0,17	0,29	0,39	0,05	0,11	0,75	0,65	0,59	1,24
n°6	Flèche avant sciage	0,48	-0,16	0,04	0,01	0,68	-0,1	0,01	-0,37	0,89	-0,1	-0,06	-0,2	0,68	-0,18	0	0,28	0,36	-0,3	-0,43	-0,28	0,41	-0,16	-0,29	-0,26	0,49	-0,06	-0,46	-0,17
	Flèche après sciage	0,29	-0,03	0,07	-0,46	0,68	-0,23	-0,11	-0,28	0,53	-0,13	-0,23	-0,18	0,89	-0,18	-0,08	-0,05	0,51	-0,6	-1,1	-0,43	0,26	-0,29	-0,25	-0,88	-0,43	-0,66	-1,11	-1,08
	Différence de flèche	0,19	-0,13	-0,04	0,47	-0,02	0,12	0,11	-0,1	0,37	0,03	0,17	-0,02	-0,22	0,02	0,06	0,33	-0,15	0,3	0,67	0,15	0,15	0,13	-0,04	0,42	0,92	0,6	0,65	0,92
n°7	Flèche avant sciage	0,86	-0,16	0,39	-0,11	0,7	0,09	-0,24	0,35	0,59	-0,19	0,14	-0,07	0,76	0,11	-0,09	-0,04	0,71	-0,09	-0,01	0,1	0,85	0,01	-0,01	-0,33	0,63	0,08	-0,33	-0,24
	Flèche après sciage	0,89	-0,32	0,08	0,07	0,75	-0,03	-0,17	0,13	0,63	-0,67	-0,21	-0,05	0,91	0,11	-0,06	0,05	0,28	-0,3	-0,15	-0	1,03	0	0,14	-0,26	-0,35	-0,6	-1,18	-0,88
	Différence de flèche	0,17	0,16	0,31	-0,18	-0,05	0,12	-0,07	0,21	-0,04	0,48	0,35	-0,02	-0,16	-0	-0,04	-0,09	0,43	0,21	0,15	0,1	-0,18	0,01	-0,16	-0,07	0,99	0,88	0,85	0,64

Annexe 4

Flèche de face		Référence des grumes							
		1a	2a	4a	6a	9a	10a	14a	15a
Débit	Plot n°1	-16,483	-9,052	-8,61	-12,625	-23,15	-0,368	-0,842	-5,004
	Plot n°2	-22,871	-18,464	-20,825	-12,365	4,91	-17,885	-16,503	-6,61
	Plot n°3	-12,075	-3,951	0	-11,402	-16,41	-13,649	-4,006	0,214
	Plot n°4	-19,225	-1,743	-6,125	-16,416	-19,587	-7,114	2,035	-10,835
	Plot n°5	-18,161	-4,956	-12,882	-22,869	-15,735	-7,89	-8,624	-8,95
sur	Plot n°6	-12,342	-11,14	-15,23	-23,576	-12,41	-8,767	-14,163	-13,16
	Plot n°7	4,637	-1,8	-15,581	-15,9	-1,032	-1,153	-13,193	3,443
Noyau	Plot n°8	0	6,006	-3,811	-9,741	0	0	0,865	-5,024
	Plot n°9	0	0	0	6,074	0	0	0	-3,844
	Plot n°10		0	0	0		0		
	Plot n°11			0	0				
	Plot n°12			0					

Flèche de face		Référence des grumes							
		3a	5a	7a	8a	11a	12a	6b	9b
Débit	Plot n°1	-28,456	-11,976	-17,49	-20,278	-26,297	-24,04	-15,625	-10,26
	Plot n°2	-14,74	-26,47	-5,455	-22,9	-11,836	-14,385	-9,969	-24,071
	Plot n°3	-17,732	-14,965	-2,66	-14,971	-8,644	-12,754	-12,359	1,285
en	Plot n°4	-14,5	-21,8	-9,033	-16,958	-1,84	1,538	-12,589	-14,804
	Plot n°5	-0,456	-5,084	1,605	-13,82	5,3	0	-6,919	-0,832
Plot	Plot n°6	-0,37	0,233	-1,412	-2,923	3,477	0	-2,349	-2,514
	Plot n°7	2,864	0	0	0,131	0	0	2,54	?

Flèche de rive		Référence des grumes							
		1a	2a	4a	6a	9a	10a	14a	15a
Débit	Plot n°1	-2,334	-0,598	0,331	6,193	0,238	-1,484	-2,467	-0,702
	Plot n°2	4,79	-2,988	-0,86	1,045	1,033	-4,455	-2,792	2,19
	Plot n°3	-1,048	-1,227	0,801	-3,591	3,687	-5,409	-0,94	1,929
	Plot n°4	0,63	-3,387	-0,199	-0,9	7	3,22	-4,079	2,39
	Plot n°5	-0,873	-3,402	2,665	2,162	9,5	-4,383	12,019	-9
sur	Plot n°6	-1,471	-1,864	-6,322	2,563	18	-4,398	-9,522	-8,5
	Plot n°7	-1,158	-1,62	2,89	1,582	21	-3,902	14,798	-9
	Plot n°8	-0,846	-2,81	-10	1,768	6,749	-4,488	-10,826	-5,702
Noyau	Plot n°9	-1,334	-2,648	-5,683	0,371	5,149	-4,199	-16,388	-5,212
	Plot n°10		-2,854	-4,43	-0,502		-5,243		
	Plot n°11			-2,697	-2,34				
	Plot n°12			4,965					

Flèche de rive		Référence des grumes							
		3a	5a	7a	8a	11a	12a	6b	9b
Débit	Plot n°1	-1,186	-0,153	4,093	0	-1,892	0	-3,017	-1,186
	Plot n°2	-3,5	0	-4,883	0	4,746	4,489	3,439	2,675
	Plot n°3	-2,13	0,561	1,577	-8,117	-2,002	2,82	4,807	1,134
sur	Plot n°4	-3,59	0,569	-2,329	6,532	-8,084	-2,033	-6,84	-1,398
	Plot n°5	-0,15	0,662	2,846	2,769	-0,024	12,383	8,803	10,773
Plot	Plot n°6	2,073	-3,869	-8,058	14,537	-14,546	6,874	-6,779	3,858
	Plot n°7	16,98	4,97	-9,997	0,853	-9,038	8,856	15,85	?

Annexe 4

Tuilage		Référence des grumes							
		1a	2a	4a	6a	9a	10a	14a	15a
Débit	Plot n°1	1,721	1,118	0,8875	1,101	0,889	0,419	0,344	1,055
	Plot n°2	1,053	1,358	0,9795	0,8725	-0,116	1,4185	1,3175	0,515
	Plot n°3	2,2975	0,051	-0,689	1,344	0,9435	0,808	0,381	0,4255
	Plot n°4	0,888	0,2945	0,283	1,431	0,643	0,5645	0,1195	0,19
sur	Plot n°5	0,4355	0,6345	0,2025	1,499	0,302	0,4465	0,554	0,1015
	Plot n°6	0,4995	1,0365	0,2205	1,706	0,407	0,811	1,279	0,3225
	Plot n°7	0,077	0,5455	0,2685	1,4595	-0,118	0,368	1,016	0,4665
Noyau	Plot n°8	-0,052	0,1665	0,4185	1,1815	0,0795	-0,0905	0,1185	-0,2865
	Plot n°9	-0,339	0,596	-0,244	0,163	-0,206	-0,026	0,038	-0,455
	Plot n°10		-0,2855	-0,5905	-0,242		-0,228		
	Plot n°11			-0,616	-0,1825				
	Plot n°12			-0,7385					

Tuilage		Référence des grumes							
		3a	5a	7a	8a	11a	12a	6b	9b
Débit	Plot n°1	2,1775	1,3515	2,3115	1,3285	1,9635	1,1455	1,3215	0,8465
	Plot n°2	0,9225	0	0,936	1,858	0,9815	1,037	0,4825	?
	Plot n°3	1,3435	1,009	0,4255	1,111	0,7275	0,971	1,179	0,2065
en	Plot n°4	0,861	1,415	0,036	1,2845	0,4445	0,036	1,2245	1,4335
	Plot n°5	0,455	0,168	0,1245	1,0445	-0,058	-0,3645	0,773	0,507
Plot	Plot n°6	0,359	0,1475	0,355	0,5385	0,2395	-0,4155	0,471	0,712
	Plot n°7	-0,1325	-0,094	-0,0985	0,6815	-0,1615	-0,444	0,2965	?

Gauchissement		Référence des grumes							
		1a	2a	4a	6a	9a	10a	14a	15a
Débit	Plot n°1	0,03039	0,01754	0,07403	0,00964	0,0224	0,00838	0,00134	0,00994
	Plot n°2	0,04427	-0,0033	0,02367	0,01467	0,01508	0,00439	0,01501	0,02537
	Plot n°3	0,00899	0,02058	0,02791	-0,0008	0,01887	-0,0011	0,00634	0,07067
	Plot n°4	0,0098	0,00839	0,0233	0,0045	-0,0044	0,00421	0,00865	0,0055
sur	Plot n°5	-0,0081	0,00269	0,0333	0,02651	-0,0121	-0,0027	0,01244	-0,001
	Plot n°6	-0,0066	-0,0014	0,01509	0,00428	0,00766	0,00882	-0,0004	0,00637
	Plot n°7	-0,0176	-0,0077	0,00465	-0,0003	-0,0043	0,00466	-0,0005	-0,0097
Noyau	Plot n°8	-0,0082	-0,01	-0,0253	0,00829	-0,0077	0,00489	-0,0026	-0,0169
	Plot n°9	-0,0201	0,0084	-0,0322	-0,0048	-0,0136	-0,0032	-0,0045	-0,0045
	Plot n°10		-0,0129	-0,0096	-0,0094		-0,0162		
	Plot n°11			-0,0101	-0,0176				
	Plot n°12			-0,0066					

Gauchissement		Référence des grumes							
		3a	5a	7a	8a	11a	12a	6b	9b
Débit	Plot n°1	0,02037	0,03484	-0,0271	0,03184	0,02397	0,01381	0,03144	0,00937
	Plot n°2	0,03212	0	0,0174	0,01248	0,01789	0,00656	0,02179	?
	Plot n°3	-0,0055	0,005	-0,0058	0,0044	0,00461	-0,0002	0,00986	0,01013
en	Plot n°4	-0,0028	0,0198	-0,0007	-0,0058	-0,0007	-0,0045	0,01491	0,01075
	Plot n°5	-0,005	0,00424	-0,0061	0,00751	-0,0023	-0,0017	0,00214	0,007
Plot	Plot n°6	0,00668	-0,0071	-0,0156	-0,0089	0,00067	-0,0022	-0,01	0,02182
	Plot n°7	-0,0101	-0,0066	-0,0027	0,00019	-0,0209	-0,0089	0,01463	?

Surépaisseur en mm (débit sur noyau)

	Arbre 1A					Arbre 2A					Arbre 4A					Arbre 6A					Arbre 9A					Arbre 10A					Arbre 14A					Arbre 15A					
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
Plot n°1	20,82	22,13	22,02	21,84	21,4	20,28	21,14	21,12	21,11	19,11	20,52	21,67	22,47	22	21,83	21,3	21,47	21,99	21,89	20,24	20,98	22,31	22,11	21,49	20,92	20,93	21,59	21,94	21,56	20,89	21,21	21,4	21,97	21,5	20,05	20,76	22,18	22,35	22,22	20,38	
Plot n°2	20,42	21,92	22,33	21,78	21,01	21,31	22,42	21,69	20,85	18,18	20,21	21,87	22,47	22,51	20,26	19,99	20,83	20,9	20,43	19,18	21,6	21,46	21,33	21,17	20,82	19,98	22,13	22,61	22,21	20,13	19,34	21,71	22,14	21,23	19,28	20,74	22,84	21,77	21,1	18	
Plot n°3	20,78	22,47	22,38	21,85	20,45	20,23	20,97	21,42	21,05	19,6	20,85	21,48	21,87	21,88	21,28	19,21	21,1	21,4	20,84	18,83	21,18	22,21	22,65	22,25	20,5	20,37	21,24	21,65	21,35	18,66	18,37	21,3	22	20,95	17,23	21,41	22,54	22,16	22,28	19,8	
Plot n°4	19,6	21,8	22,55	21,75	19,55	20,56	22,8	23,09	22,37	20,29	19,95	21,37	22,11	21,9	21,17	23,78	21,48	21,3	21,78	23,1	19,45	21,53	22,43	21,67	19,87	20,28	21,68	21,65	21,8	20,28	20,48	21,24	21,94	20,74	17,33	19,34	21,74	22,4	22,8	18,56	
Plot n°5	19,97	22,1	22,85	21,55	19,25	18,98	21,89	22,57	21,84	19,48	19,39	21,5	22,12	22,08	20,95	20,17	21,63	21,9	21,28	18,88	19,38	21,5	22,31	21,74	19,5	12,11	20,82	22,72	21,55	17,88	22,17	22,11	22,34	21,54	20,57	18,27	21,2	22,35	21,35	19,64	
Plot n°6	19,7	21,85	22,3	21,47	19,25	18,54	21,35	22,81	22,15	19,32	19,07	21,83	22,8	22,49	20,04	16,33	21,2	22,05	20,78	16,85	19,08	21,44	22,42	21,5	19,45	18,32	22,21	23,17	22,37	19,54	23,4	22,06	22,37	22,29	23,18	18	21,46	22,5	22,17	19,8	
Plot n°7	20,4	21,63	22,09	21,65	19,65	18,4	21,74	22,47	21,72	19,59	19,47	21,42	22,37	22,12	19,03	16,43	21,07	22,55	21,5	17,52	19,43	21,47	22,71	21,98	20,38	18,47	21,88	22,52	21,81	20,74	21,63	21,85	22,07	22,17	22,46	18	21,33	21,93	21,52	20,83	
Plot n°8	20,65	21,2	21,5	21,5	21,02	19,84	21,81	22,07	21,69	20,44	20,57	21,88	22,06	21,86	19,34	15,57	20,34	22,13	21,61	18,11	19,57	21,02	21,37	21,78	21,02	19,87	21,48	21,72	21,51	21,69	22,8	22,24	22,4	22,19	26,78	20	21,52	22,13	22,45	22,77	
Plot n°9	21,5	21,8	21,8	21,15	21,35	21,48	21,74	21,98	21,48	21,38	28,46	28,19	27,8	28,9	24,17	16,4	21,29	21,63	20,9	18,87	21,16	21,92	23,22	22,03	20,65	21,97	22,14	22,05	21,68	23,05	21,53	24,83	21,82	21,07	20,55	22	21,73	21,76	22,11	22,96	
Plot n°10						23,08	22,16	22,96	22,17	22,63	22,14	21,81	21,87	21,64	20,72	18	20,53	21,4	21,12	20,2						23,09	21,82	23,38	21,81	23,07											
Plot n°11											22,66	22,02	21,85	21,74	21,18	20,04	21,14	21,97	20,87	20,2																					
Plot n°12											21,86	21,71	21,88	21,81	21,75																										

Annexe 4

Surépaisseur en mm (débit en plot)

59

	Arbre 3A					Arbre 5A					Arbre 7A					Arbre 8A					Arbre 11A					Arbre 12A					Arbre 6B					Arbre 9B				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Plot n°1	19,69	21,88	21,87	21,76	19,53	21,17	22,02	22,28	22,05	20,52	18,89	20,76	21,47	21,03	19,8	20,34	21,18	21,47	21,02	20,2	19,21	20,7	21,81	21,98	20,07	21,32	21,8	21,74	21,66	20,36	20,83	21,11	21,56	21,5	19,9	21,1	21,3	22,2	22	20,3
Plot n°2	20,61	20,88	21,25	20,54	18,88	21	21,88	22,1	21,36	20	21,11	21,32	21,69	21,14	19,14	20,28	20,92	21,28	20,29	18,43	20,45	21,13	21,78	21,29	20,14	19	21	21,82	21,4	20	21,02	21,71	21,67	21,41	20,04	20,5	21,9	22,2	21,8	19,6
Plot n°3	20,9	21,78	22,11	22,05	21,83	22,33	22,52	22,6	23,57	25,48	22,05	21,62	22	21,79	20,93	22,35	22,12	21,69	22,04	23,9	21,58	21,88	21,79	21,26	21,73	20,42	20,72	21,73	21,57	19,82	22,27	21,91	22,19	21,89	21,72	21,2	19,9	18,8	18,5	19,8
Plot n°4	22,1	22,09	22,34	21,97	22,23	21,14	22,11	22	22	22,22	20,96	21,69	22,26	22,12	22,43	21,41	22,28	22,66	22,33	21,9	20,95	21,12	21,34	21,27	21,82	19,13	20,91	21,91	21,56	20,47	21,8	21,79	22,17	22,06	21,11	20,9	22,4	23	22,5	21,7
Plot n°5	20,83	21,5	21,35	21,73	22,05	22,91	22,68	22,61	22,84	23,5	20,83	21,96	22,6	22,15	23,05	22,3	22,2	22,1	22,9	20,89	22,59	22,36	22,18	22,37	18,78	21,04	21,43	21,05	20,16	22,22	21,79	21,76	21,79	22,33	22,3	22,9	23,2	22,8	22,8	
Plot n°6	21,24	21,24	22,83	22	24,32	20,93	21,75	22,14	22,49	24,84	21,48	21,85	21,79	21,87	21,8	22,3	22,9	22,6	22,8	24,2	22,88	22,82	22,95	21,02	20,56	20	21,55	21,86	20,8	18,84	21,67	21,86	21,6	21,5	22,02	22,5	21,6	21,4	22	25,1
Plot n°7	23	25,18	21,98	20,58	21,97	25,76	28	23,36	22,81	18,95	25,88	26,62	21,52	23,28	25,68	24,4	25,4	21,9	21,3	25,5	23,98	26,44	24,43	23,11	20,4	18,94	20,84	20,85	21,09	22,22	22,42	24,33	22,61	20,91	21,35					

1: surépaisseur coté petit diamètre
5: surépaisseur coté gros diamètre

3: surépaisseur au milieu de l'avivé
2, 4 : surépaisseur adjacente

Principe de modélisation et de redistribution des contraintes au cours du sciage

Méthode par récurrence:

Etat initial :

Dans l'état initial, la grume a la configuration suivante :

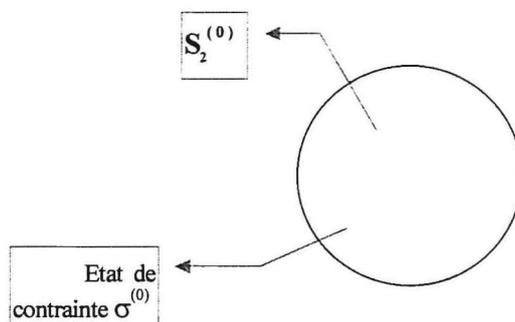
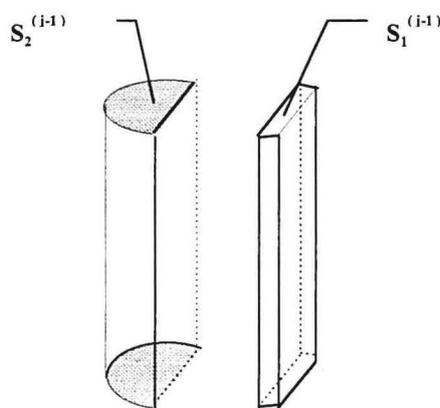


Figure 1 : configuration initiale

Sa déformation est telle que la courbure est nulle.



Etat J-1

Figure 2 : grume et débit après la coupe j-1.

Etat j-1 :

$S_2^{(j-1)}$ désigne la section de la grume après la coupe (j-1).

$S_1^{(j-1)}$ désigne la section du (j-1)^{ème} débit.

Hypothèse de récurrence :

On imagine que l'on connaît la configuration de la grume et l'état de contrainte associé, après la coupe j-1. (voir Figure 13)

Soit, $\sigma(j-1)$, cet état de contrainte:

$$\sigma^{(j-1)} = \sigma^{(0)} + \Delta\sigma^{(j-1)}$$

où $\Delta\sigma^{(j-1)}$ est le supplément de contrainte entre l'état initial et l'état (j-1).

Annexe 5

On suppose que l'on sait écrire l'incrément de déformation du bois de la grume entre l'état 0 et l'état j-1, soit :

$$\Delta \varepsilon^{(j-1)} = -a^{(j-1)} \cdot [x - X^{(j-1)}] \quad (2)$$

où $a^{(j-1)}$ et $X^{(j-1)}$ sont la courbure et l'axe-neutre de la grume après le débit j-1.

D'après la loi de Hooke, on a :

$$\Delta \sigma^{(j-1)} = E \cdot \Delta \varepsilon^{(j-1)} \quad (3)$$

L'état de contrainte pour la grume peut alors s'écrire, d'après (1), (2), (3) :

$$\sigma^{(j-1)} = \sigma^{(0)} - a^{(j-1)} \cdot [x - X^{(j-1)}] \quad (4)$$

L'hypothèse de récurrence consiste donc à poser que la contrainte dans l'état j-1 prend la forme de l'équation (4).

On a donc pour la grume (j-1) :

$$\sigma^{(j-1)} = \sigma^{(0)} - a^{(j-1)} \cdot [x - X^{(j-1)}] \text{ sur } S_2^{(j-1)}$$

Ecrivons l'équilibre mécanique de la grume après le débit j-1 :

Soit, sur $S_2^{(j-1)}$:

$$\int_{S_2^{(j-1)}} \sigma^{(j-1)} \cdot ds = 0$$

et

$$\int_{S_2^{(j-1)}} \sigma^{(j-1)} \cdot x \cdot ds = 0$$

qui peut s'écrire d'après (5) :

$$\begin{cases} 0 = \int_{S_2^{(j-1)}} \sigma^{(0)} \cdot ds - \int_{S_2^{(j-1)}} E \cdot a_2^{(j-1)} \cdot (x - X_2^{(j-1)}) \cdot ds \\ 0 = \int_{S_2^{(j-1)}} \sigma^{(0)} \cdot x \cdot ds - \int_{S_2^{(j-1)}} E \cdot a_2^{(j-1)} \cdot (x - X_2^{(j-1)}) \cdot x \cdot ds \end{cases}$$

On définit, pour une portion S de la section initiale donnée, les moments d'ordre 0 et 1 :

$$M_S^0 = - \int_S \sigma^{(0)} \cdot ds$$

$$M_S^1 = \int_S \sigma^{(0)} \cdot x \cdot ds$$

et les rigidités globales :

$$K_S^0 = \int_S E \cdot ds$$

$$K_S^1 = \int_S E \cdot x \cdot ds$$

$$K_S^2 = \int_S E \cdot x^2 \cdot ds$$

On a alors :

$$\begin{cases} M_{S_2^{(j-1)}}^0 = -a^{(j-1)} \cdot (K_{S_2^{(j-1)}}^1 - X^{(j-1)} \cdot K_{S_2^{(j-1)}}^0) \\ M_{S_2^{(j-1)}}^1 = a^{(j-1)} \cdot (K_{S_2^{(j-1)}}^2 - X^{(j-1)} \cdot K_{S_2^{(j-1)}}^1) \end{cases}$$

Après calculs, on a :

$$X^{(j-1)} = \frac{M_{S_2^{(j-1)}}^1 \cdot K_{S_2^{(j-1)}}^1 + M_{S_2^{(j-1)}}^0 \cdot K_{S_2^{(j-1)}}^2}{M_{S_2^{(j-1)}}^1 \cdot K_{S_2^{(j-1)}}^0 + M_{S_2^{(j-1)}}^0 \cdot K_{S_2^{(j-1)}}^1}$$

et

$$a^{(j-1)} = \frac{M_{S_2^{(j-1)}}^1 \cdot K_{S_2^{(j-1)}}^0 + M_{S_2^{(j-1)}}^0 \cdot K_{S_2^{(j-1)}}^1}{K_{S_2^{(j-1)}}^0 \cdot K_{S_2^{(j-1)}}^2 - \left(K_{S_2^{(j-1)}}^1\right)^2}$$

où $X^{(j-1)}$ et $a^{(j-1)}$ sont respectivement l'axe-neutre et la courbure de la grume après le débit (j-1).

Coupe j

A partir de l'état j-1, on effectue une j^{ème} coupe :

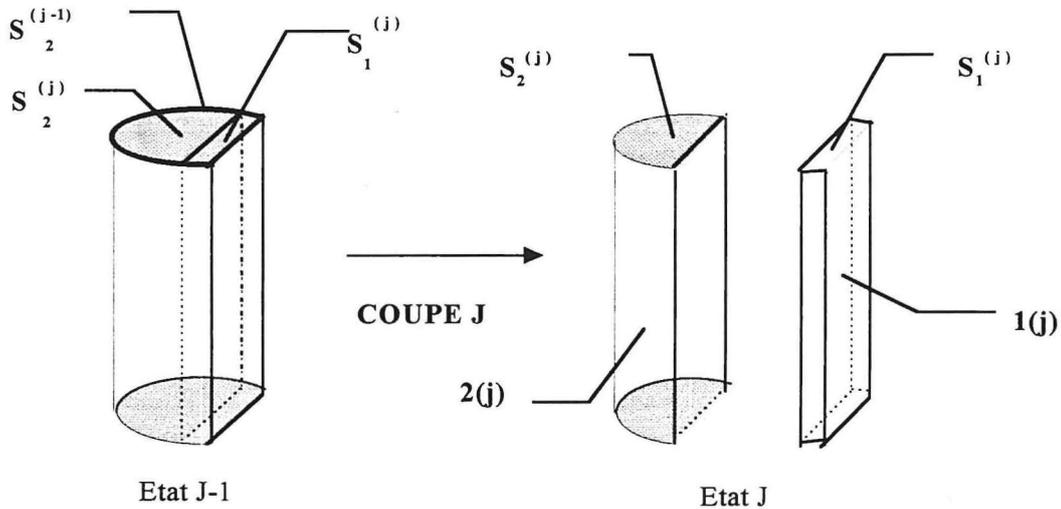


Figure 3 : coupe n°j

Le débit j, avant qu'il ne soit scié est représenté par la section $S_1^{(j)}$ et son état de contrainte correspond à celui de la grume $S_2^{(j-1)}$.

La grume j, avant qu'elle ne soit sciée est représentée par la section $S_2^{(j)}$ et son état de contrainte correspond à celui de la grume $S_2^{(j-1)}$ (voir Figure 13).

On peut écrire la contrainte $\delta\sigma^{(j)}$ due à cette j^{ème} coupe pour les 2 parties:

Le raisonnement est alors le même pour les 2 parties ;

Plaçons nous sur une des 2 parties :

Comme on a fait l'hypothèse des petites perturbations, on peut "linéariser le problème". La contrainte $\delta\sigma^{(j)}$ s'ajoute alors à l'état de contrainte au moment de la coupe défini par $\sigma^{(j-1)}$.

On a alors :
$$\sigma^{(j)} = \sigma^{(j-1)} + \delta\sigma^{(j)}$$

Soit $\delta\varepsilon^{(j)}$, la déformation associée à la contrainte $\delta\sigma^{(j)}$; on a alors, d'après la loi de Hooke :

$$\sigma^{(j)} = \sigma^{(j-1)} + E \cdot \delta\varepsilon^{(j)}$$

D'après l'hypothèse 2 faite au 3-A-1, on peut écrire cette déformation pour les 2 parties sous la forme:

$\Delta\varepsilon^{(j)} = -E \cdot [\delta a^{(j)} \cdot (x - x^{(j)})]$ où $\delta a^{(j)}$ est la courbure et $x^{(j)}$ l'axe-neutre associée à cette nouvelle déformation.

D'où :

$$\sigma^{(j)} = \sigma^{(j-1)} - E \cdot \left[\delta a^{(j)} \cdot (x - x^{(j)}) \right]$$

Comme on connaît, d'après l'hypothèse de récurrence, l'état de contrainte après la coupe j-1 (équation 5), on peut exprimer le nouvel état de contrainte :

$$\sigma^{(j)} = \sigma^{(0)} - E \cdot a^{(j-1)} \cdot (x - X^{(j-1)}) - E \cdot \delta a^{(j)} \cdot (x - x^{(j)})$$

d'où :

$$\sigma^{(j)} = \sigma^{(0)} - E \cdot \left[\left(a^{(j-1)} + \delta a^{(j)} \right) \cdot x - \left(a^{(j-1)} \cdot X^{(j-1)} + \delta a^{(j)} \cdot x^{(j)} \right) \right]$$

où $\delta a^{(j)}$ et $x^{(j)}$ sont les courbures et l'axe neutre concernant la grume ou le débit suivant la partie considérée.

Si on pose :

$$a^{(j)} = a^{(j-1)} + \delta a^{(j)}$$

et

$$\alpha^{(j)} = a^{(j-1)} \cdot X^{(j-1)} + \delta a^{(j)} \cdot x^{(j)}$$

on a alors :

$$\sigma^{(j)} = \sigma^{(0)} - E \cdot \left(a^{(j)} \cdot x - \alpha^{(j)} \right)$$

ou, si on suppose $a_j \neq 0$: $\sigma^{(j)} = \sigma^{(0)} - E \cdot a^{(j)} \cdot (x - X^{(j)})$ avec $X^{(j)} = \frac{\alpha^{(j)}}{a^{(j)}}$

On retrouve ici la forme de l'équation de distribution des contraintes de l'hypothèse de récurrence.

Cet état de contrainte donne la nouvelle courbure et l'axe neutre après la coupe (j) en fonction de la courbure et de l'axe neutre de l'état j-1.

On a donc une loi de récurrence qui permet d'obtenir la déformation de la grume et du débit après une coupe j : $\varepsilon^{(j)} = -a^{(j)} \cdot [x - X^{(j)}]$

Il reste à identifier les termes $\delta a^{(j)}$ et $x^{(j)}$. Ils prennent des valeurs différentes sur la grume et le débit; nous les noterons :

-pour la grume après la coupe j : $\delta a_2^{(j)}$ et $x_2^{(j)}$

-pour le débit j : $\delta a_1^{(j)}$ et $x_1^{(j)}$

Pour cela, écrivons l'équilibre mécanique de la grume j-1, du débit j et de la grume j;

Pour le débit j, soit $S_1^{(j)}$ on a :

$$0 = \int_{S_1^{(j)}} \sigma^{(j)} \cdot ds = \int_{S_1^{(j)}} \sigma^{(j-1)} + \delta \sigma^{(j-1)} \cdot ds$$

et

$$0 = \int_{S_1^{(j)}} \sigma^{(j)} \cdot x \cdot ds = \int_{S_1^{(j)}} (\sigma^{(j-1)} + \delta \sigma^{(j-1)}) \cdot x \cdot ds \quad (7)$$

Cela s'écrit:

$$0 = \int_{S_1^{(j)}} \sigma^{(j)} \cdot ds = \int_{S_1^{(j)}} \sigma^{(j-1)} \cdot ds + \int_{S_1^{(j)}} \delta \sigma^{(j)} \cdot ds$$

et

$$0 = \int_{S_1^{(j)}} \sigma^{(j)} \cdot x \cdot ds = \int_{S_1^{(j)}} \sigma^{(j-1)} \cdot x \cdot ds + \int_{S_1^{(j)}} \delta \sigma^{(j)} \cdot x \cdot ds \quad (8)$$

De même, l'équilibre de la grume j s'écrit :

$$0 = \int_{S_2^{(j)}} \sigma^{(j)} \cdot ds = \int_{S_2^{(j)}} \sigma^{(j-1)} \cdot ds + \int_{S_2^{(j)}} \delta \sigma^{(j)} \cdot ds$$

$$0 = \int_{S_2^{(j)}} \sigma^{(j)} \cdot x \cdot ds = \int_{S_2^{(j)}} \sigma^{(j-1)} \cdot x \cdot ds + \int_{S_2^{(j)}} \delta \sigma^{(j)} \cdot x \cdot ds \quad (10)$$

Comme on le voit sur la figure 13 :

$$S_2^{(j-1)} = S_2^{(j)} + S_1^{(j)}$$

d'où, l'équilibre de la grume (j-1) s'écrit, :

$$0 = \int_{S_2^{(j-1)}} \sigma^{(j-1)} \cdot ds = \int_{S_2^{(j)}} \sigma^{(j-1)} \cdot ds + \int_{S_1^{(j)}} \sigma^{(j-1)} \cdot ds$$

et

$$0 = \int_{S_2^{(j-1)}} \sigma^{(j-1)} \cdot x \cdot ds = \int_{S_2^{(j)}} \sigma^{(j-1)} \cdot x \cdot ds + \int_{S_1^{(j)}} \sigma^{(j-1)} \cdot x \cdot ds \quad (11)$$

Annexe 5

Intéressons nous tout d'abord au débit (j) :

Si on soustrait (8) de (11), en tenant compte de $\sigma^{(j-1)} = \sigma^{(0)} + \Delta\sigma^{(j-1)}$:

$$\int_{S_1^{(j)}} \delta\sigma^{(j)} . ds = \int_{S_2^{(j)}} \sigma^{(j-1)} . ds = \int_{S_2^{(j)}} [\sigma^{(0)} + \Delta\sigma^{(j-1)}] . ds$$

et

$$\int_{S_1^{(j)}} \delta\sigma^{(j)} . x . ds = \int_{S_2^{(j)}} \sigma^{(j-1)} . x . ds = \int_{S_2^{(j)}} [\sigma^{(0)} + \Delta\sigma^{(j-1)}] . x . ds$$

Comme $\Delta\sigma^{(j-1)} = - E . a^{(j-1)} . (x - X^{(j-1)})$

et, sur $S_1^{(j)}$ $\delta\sigma^{(j)} = - E . \delta a_1^{(j)} . (x - x_1^{(j)})$

On trouve :

$$\left\{ \begin{aligned} - \int_{S_1^{(j)}} E \delta a_1^{(j)} (x - x_1^{(j)}) ds &= \int_{S_2^{(j)}} \sigma^{(0)} ds - \int_{S_2^{(j)}} E a^{(j-1)} (x - X^{(j-1)}) ds \\ - \int_{S_1^{(j)}} E \delta a_1^{(j)} (x - x_1^{(j)}) x ds &= \int_{S_2^{(j)}} \sigma^{(0)} x . ds - \int_{S_2^{(j)}} E . a^{(j-1)} (x - X^{(j-1)}) x ds \end{aligned} \right.$$

Soit :

$$\left\{ \begin{aligned} - \delta a_1^{(j)} \left[K_{S_1^{(j)}}^1 - x_1^{(j)} K_{S_1^{(j)}}^0 \right] &= - M_{S_2^{(j)}}^0 - a^{(j-1)} \left[K_{S_2^{(j)}}^1 - X^{(j-1)} K_{S_2^{(j)}}^0 \right] \\ - \delta a_1^{(j)} \left[K_{S_1^{(j)}}^2 - x_1^{(j)} K_{S_1^{(j)}}^1 \right] &= M_{S_2^{(j)}}^1 - a^{(j-1)} \left[K_{S_2^{(j)}}^2 - X^{(j-1)} K_{S_2^{(j)}}^1 \right] \end{aligned} \right. \quad (12)$$

De même si on soustrait (7) à (11), on obtient les équations concernant la grume :

$$\int_{S_2^{(j)}} \delta\sigma^{(j)} . ds = \int_{S_1^{(j)}} \sigma^{(j-1)} . ds = \int_{S_1^{(j)}} [\sigma^{(0)} + \Delta\sigma^{(j-1)}] . ds$$

et

$$\int_{S_2^{(j)}} \delta\sigma^{(j)} . x . ds = \int_{S_1^{(j)}} \sigma^{(j-1)} . x . ds = \int_{S_1^{(j)}} (\sigma^{(0)} + \Delta\sigma^{(j-1)} . x) . ds$$

ce qui donne :

$$\left\{ \begin{aligned} - \int_{S_2^{(j)}} E \delta a_2^{(j)} (x - x_2^{(j)}) ds &= \int_{S_1^{(j)}} \sigma^{(0)} ds - \int_{S_1^{(j)}} E a^{(j-1)} (x - X^{(j-1)}) ds \\ - \int_{S_2^{(j)}} E . \delta a_2^{(j)} (x - x_2^{(j)}) x ds &= \int_{S_1^{(j)}} \sigma^{(0)} x ds - \int_{S_1^{(j)}} E a^{(j-1)} (x - X^{(j-1)}) x ds \end{aligned} \right.$$

Soit :

$$\left\{ \begin{aligned} - \delta a_2^{(j)} \left[K_{S_2^{(j)}}^1 - x_2^{(j)} K_{S_2^{(j)}}^0 \right] &= - M_{S_1^{(j)}}^0 - a^{(j-1)} \left[K_{S_1^{(j)}}^1 - X^{(j-1)} K_{S_1^{(j)}}^0 \right] \\ - \delta a_2^{(j)} \left[K_{S_2^{(j)}}^2 - x_2^{(j)} K_{S_2^{(j)}}^1 \right] &= M_{S_1^{(j)}}^1 - a^{(j-1)} \left[K_{S_1^{(j)}}^2 - X^{(j-1)} K_{S_1^{(j)}}^1 \right] \end{aligned} \right. \quad (13)$$

Posons :

$$\left\{ \begin{aligned} r_1^{(j)} &= - M_{S_1^{(j)}}^0 - a^{(j-1)} \left[K_{S_1^{(j)}}^1 - X^{(j-1)} K_{S_1^{(j)}}^0 \right] \\ s_1^{(j)} &= M_{S_1^{(j)}}^1 - a^{(j-1)} \left[K_{S_1^{(j)}}^2 - X^{(j-1)} K_{S_1^{(j)}}^1 \right] \end{aligned} \right.$$

Annexe 5

On trouve pour $x_2^{(j)}$:

$$x_2^{(j)} = \frac{r_1(j) \cdot K_{S_2^{(j)}}^2 - s_1(j) \cdot K_{S_2^{(j)}}^1}{r_1(j) \cdot K_{S_2^{(j)}}^1 - s_1(j) \cdot K_{S_2^{(j)}}^0} \quad (14)$$

et pour $\delta a_2^{(j)}$

$$\delta a_2^{(j)} = \frac{r_1(j) \cdot K_{S_2^{(j)}}^1 - s_1(j) \cdot K_{S_2^{(j)}}^0}{(K_{S_2^{(j)}}^1)^2 - K_{S_2^{(j)}}^2 \cdot K_{S_2^{(j)}}^0}$$

De même, en posant :

$$\begin{cases} r_2^{(j)} = -M_{S_2^{(j)}}^0 - a_2^{(j-1)} \left[K_{S_2^{(j)}}^1 - X_2^{(j-1)} K_{S_2^{(j)}}^0 \right] \\ s_2^{(j)} = M_{S_2^{(j)}}^1 - a_2^{(j-1)} \left[K_{S_2^{(j)}}^2 - X_2^{(j-1)} K_{S_2^{(j)}}^1 \right] \end{cases}$$

On a:

$$x_1^{(j)} = \frac{r_2(j) \cdot K_{S_1^{(j)}}^2 - s_2(j) \cdot K_{S_1^{(j)}}^1}{r_2(j) \cdot K_{S_1^{(j)}}^1 - s_2(j) \cdot K_{S_1^{(j)}}^0} \quad (15)$$

et pour $\delta a_1^{(j)}$

$$\delta a_1^{(j)} = \frac{r_2(j) \cdot K_{S_1^{(j)}}^1 - s_2(j) \cdot K_{S_1^{(j)}}^0}{(K_{S_1^{(j)}}^1)^2 - K_{S_1^{(j)}}^2 \cdot K_{S_1^{(j)}}^0}$$

Il peut être intéressant de connaître la courbure totale des fibres du débit (j); elles s'obtiendraient avec :

$$a_1^{(j)} = a_1^{(j-1)} + \delta a_1^{(j)}$$