

**MISSION D'ETUDE DANS LES
PLANTATIONS CLONALES
D'EUCALYPTUS A CROISSANCE RAPIDE
DU CONGO: DEFORMATIONS
RESIDUELLES LONGITUDINALES DE
CROISSANCE.**

- Henri BAILLERES -

**C.T.F.T.
L.M.G.C.
L.R.B.B.**

Mission du 15 Juin au 1 Septembre 1991

**MISSION D'ETUDE DANS LES
PLANTATIONS CLONALES
D'EUCALYPTUS A CROISSANCE RAPIDE
DU CONGO: DEFORMATIONS
RESIDUELLES LONGITUDINALES DE
CROISSANCE.**

- Henri BAILLERES -

**C.T.F.T.
L.M.G.C.
L.R.B.B.**

Mission du 15 Juin au 1 Septembre 1991

SOMMAIRE

Pages

INTRODUCTION

I - LE CONTEXTE ACTUEL : DE GRANDES POTENTIALITES.....	1
II - LE POINT SUR LES CONNAISSANCES ET LES OUTILS D'INTERPRETATION DES CONTRAINTES DE CROISSANCE.....	1
II.1 - Origine des contraintes internes de l'arbre sur pied : croissance et maturation du bois.....	2
II.2 - Les techniques d'investigation des contraintes de croissance.....	4
II.3 - Quelques ordres de grandeur, signification.....	6
II.4 - Evaluation expérimentale des déformations de maturation à la surface de l'arbre sur pied.....	7
II.5 - Principaux résultats expérimentaux d'ensemble.....	9
III - UN OUTIL MECANIQUE D'ANALYSE DES CONTRAINTES DE CROISSANCE.....	11
IV - LE CHAMP D'EXPERIMENTATION.....	12
IV.1 - Présentation.....	12
IV.2 - L'amélioration génétique des eucalyptus tropicaux.....	13
IV.3 - Le milieu naturel.....	13
IV.4 - Le matériel végétal de l'étude.....	13
V - PRINCIPES DE L'ETUDE.....	14
V.1 - Buts.....	14
V.2 - Estimation des déformations résiduelles longitudinales de croissance.....	14
<u>V.2.1 - La méthode dite du trou unique.....</u>	15
<u>V.2.2 - La méthode des deux rainures.....</u>	17
<u>V.2.3 - Comparaison des deux méthodes.....</u>	21

	Pages
VI - CHOIX DES ARBRES ET DU TYPE DE MESURE.....	24
VII - ANALYSE DES RESULTATS ARBRE SUR PIED.....	25
VII.1 - Analyse globale des valeurs obtenues.....	25
VII.2 - Analyse des déformations résiduelles sur la couronne.....	27
<u>VII.2.1 - Dissymétrie angulaire.....</u>	<u>27</u>
<u>VII.2.2 - Influence de l'inclinaison de l'arbre.....</u>	<u>29</u>
VII.3 - Evaluation des contraintes et déformations de support.....	30
VII.4 - Observations de l'effet de l'écartement sur les DRLP.....	31
VII.5 - Evolution avec l'âge.....	33
VIII - ANALYSE DES RESULTATS ARBRE ABATTU.....	35
IX - ANALYSE DES FENTES EN BOUT.....	38
<u>CONCLUSION.....</u>	<u>39</u>
ANNEXE I - Exemples de fiches de résultats	
ANNEXE II - Variation des déformations résiduelles longitudinales périphériques avec la hauteur arbre debout	
ANNEXE III - Cartographie des fentes en bout des billons échantillons	
BIBLIOGRAPHIE	

INTRODUCTION

Cette mission est le fruit de la collaboration entre trois laboratoires partenaires au sein du Groupement Scientifique Rhéologie et Mécanique du Bois ayant des compétences complémentaires pour l'étude engagée qui s'insère dans le programme "Architecture, Structure et Mécanique de l'Arbre" (ASMA) mené avec succès depuis maintenant deux ans. Les trois laboratoires impliqués dans la présente étude sont:

- le 'Laboratoire de Mécanique et Génie Civil' de Montpellier, URA 1214 du CNRS.
- la division 'essais et emplois des bois' du C.T.F.T. département du C.I.R.A.D.
- le 'Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux' UMR 123: CNRS-INRA-UNIVERSITE DE BORDEAUX 1.

La campagne de mesures qui s'est déroulée du 16 Juillet 1991 au 28 Août 1991 à POINTE NOIRE au CONGO a été effectuée par un groupe de 5 personnes (équipe ASMA) appartenant aux différents laboratoires déjà cités: Bernard CHANSON, Meriem FOURNIER, Caroline LOUP, Jean GERARD et Henri BAILLERES. L'accueil de ceux-ci durant la mission a été assuré conjointement par l'Union d'Afforestation Industrielle du Congo (UAIC) et le CTFT Congo que je tiens à remercier ici pour le dévouement et la compréhension dont ils ont fait preuve.

D'un point de vue fondamental, l'intérêt particulier des plantations d'Eucalyptus du CONGO est motivé par la diversité et l'identification génétique du matériel d'étude, la diversité des dispositifs sylvicoles concernés, la vitesse de croissance sous conditions tropicales (c'est-à-dire tous les éléments qui permettent d'envisager la réalisation d'un programme efficace et cohérent dans un laps de temps réduit par rapport à celui que représenterait un tel programme sur une espèce tempérée). D'un point de vue appliqué, l'intérêt réside dans la diversification des potentialités des plantations clonales, une meilleure connaissance des contraintes de croissance pourrait accroître les possibilités d'utilisation autres que papetières.

I - LE CONTEXTE ACTUEL: DE GRANDES POTENTIALITES

Parmi les quelques 600 espèces d'Eucalyptus actuellement inventoriées, à peine seulement quelques dizaines sont utilisées en reboisement et exploitées de façon plus ou moins industrielle.

Les plantations d'Eucalyptus hors de leurs aires naturelles de répartition (Australie et îles avoisinantes) ont répondu et répondent encore à des objectifs de différentes natures, notamment:

- la protection et la stabilisation des sols érodés et appauvris.
- la production de combustible et de petits bois ronds pour les populations locales (bois de service).
- la fourniture de matière première de haute qualité pour la fabrication de la pâte à papier. Dans ce cas l'amélioration porte surtout sur le rendement matière par unité de surface plantée.

A l'heure actuelle, les produits fournis par les plantations d'Eucalyptus au niveau mondial se répartissent approximativement comme suit [F.A.O., 1982]:

- 85% pour le bois de service et de trituration
- 10% pour les perches et les bois ronds de qualité
- 5% pour le bois de sciage

La meilleure possibilité qui s'offre pour les pays et pour les propriétaires forestiers d'accroître la valeur des petits bois produits par les plantations d'Eucalyptus est de les convertir en papier, qui est de tous les dérivés de ce bois celui qui a la valeur unitaire la plus élevée. Toutefois, les contraintes résultant de la taille minimale d'une usine économiquement viable impliquent que ce sont les pays qui ont de grandes superficies de reboisements d'Eucalyptus, tels que le Brésil, l'Inde, l'Afrique du Sud, l'Espagne et le Portugal, qui auront le plus de chances de pouvoir mettre à profit cette possibilité. Dans les pays ayant des programmes de reboisement plus modestes, mais d'importance non négligeable, la meilleure voie pour accroître la valeur unitaire de la matière première produite par les plantations d'Eucalyptus consiste à investir davantage en vue de mieux valoriser et/ou d'accroître les peuplements pouvant donner des bois ronds et des sciages de valeurs. Certains pays africains utilisent d'ores et déjà leurs bois d'Eucalyptus pour un grand nombre d'emplois, accroissant ainsi considérablement la valeur ajoutée.

Pour l'instant, la valorisation de cette ressource sous forme de bois d'oeuvre est rendue très difficile soit par les méthodes contraignantes qu'elle nécessite, soit par l'importance considérable des déchets qu'elle provoque. Les deux principaux facteurs connus qui entraînent ces inconvénients et qui semblent limiter cette valorisation sont:

- Les contraintes de croissance d'intensité élevée et de variabilité importante associées à un matériau peu résistant: provoquant ainsi des fentes plus ou moins importantes et le gauchissement des pièces débitées. Ces deux défauts sont souvent très préjudiciables aux usinages ultérieurs et au rendement matière: c'est sans nul doute la singularité qui limite le plus la transformation sous forme de bois d'oeuvre.
- Les déformations de séchage dues:
 - > au collapse: ayant pour conséquence une ruine partielle du matériau, rendu ainsi difficilement utilisable.
 - > à des retraits élevés, fortement anisotropes et variables au sein de l'arbre: entraînant des déformations et des fentes conséquentes lors de l'opération de séchage.

Dans la suite de cette étude nous nous intéresseront plus particulièrement aux problèmes essentiels rencontrés durant la première transformation: de l'abattage jusqu'au premier débit, à savoir les effets liés aux contraintes de croissance. Dans un premier temps nous exposerons brièvement les connaissances et les outils à notre disposition pour mener nos recherches.

II - LE POINT SUR LES CONNAISSANCES ET LES OUTILS D'INTERPRETATION DES CONTRAINTES DE CROISSANCE

II.1 - Origine des contraintes internes de l'arbre sur pied: croissance et maturation du bois

La matière ligneuse, au cours de son élaboration, est soumise à des contraintes internes auto-équilibrées dites de croissance, dont les conséquences peuvent être néfastes pour le technologue: rupture à l'abattage, voilement des débits et apparition de fentes en scierie. Elles résultent de l'histoire de la croissance de la plante et sont d'une part le fait du cumul des contraintes de support, liées aux

accroissements massifs saisonniers de la structure, d'autre part et essentiellement le fait du cumul de contraintes liées à la maturation cellulaire. Celle-ci se déroule en quelques jours ou semaines au cours de la différenciation cellulaire qui a lieu à proximité de l'assise cambiale libéro-ligneuse (création d'un nouvel élément du xylème secondaire) et s'accompagne de **retraits longitudinaux** (sauf bois de compression) et de **gonflements transversaux** dont les conséquences mécaniques sont des contraintes internes néfastes à la transformation, puisque les nouveaux éléments cellulaires sont solidaires, en quelque sorte "collés" au massif ligneux rigide préexistant qui "contrarie" la tendance originelle. Durant la différenciation cellulaire, au cours de chaque période de croissance radiale (croissance secondaire), lors de la lignification et de la cristallisation de la cellulose (polymérisation biochimique), les cellules nouvellement créées subissent donc des déformations qui apportent, par rééquilibrage mécanique, une contribution à l'état de contraintes internes du massif ligneux déjà en place [KUBLER, ARCHER, OKUYAMA]. Ce dernier mécanisme, est en fait le "moteur" interne qui permet à l'arbre d'assurer une réorientation de sa tige par la croissance secondaire [FOURNIER, 1989]. Les phénomènes de différenciation au niveau des parois cellulaires secondaires qui font évoluer une cellule à paroi mince faite de cellulose peu cristalline à une cellule à paroi épaisse, rigide et lignifiée, seront appelés "**maturation**". A l'échelle macroscopique, une quantité élémentaire de bois isolé avant et après maturation n'aurait pas la même forme et occuperait un volume différent. Cette assertion s'appuie sur deux phénomènes principaux possibles à l'échelle de la paroi S2:

- puisque la lignine occupe dans cette paroi les mêmes types de sites que l'eau, la lignification provoque des variations dimensionnelles analogues à une reprise d'humidité. La matrice composée de lignines et d'hémicelluloses pousse le filet de microfibrilles. Il en résulte une expansion transverse et une contraction longitudinale [BOYD, 1972, 1980, 1985].

- la cristallisation de la cellulose dans les microfibrilles s'accompagne d'un retrait. Dans le milieu 'fibrilles'+matrice', il en résulte encore une contraction longitudinale et un gonflement transverse [BAMBER, 1987].

La combinaison des deux théories permet de rendre compte de toutes les situations structurales présence de bois de réaction, essences feuillues ou résineuses ..., avec peut-être une prédominance du premier phénomène chez les résineux dont les hélices de microfibrilles sont plus inclinées surtout dans le bois de compression, et du second chez les feuillus qui ont des déformations résiduelles plus élevées, des hélices de microfibrilles peu inclinées, beaucoup de cellulose, notamment dans le bois de tension [SASAKI et al., 1978; WILSON, 1981]. A l'échelle de la paroi S2, l'analyse quantitative micro-mécanique des phénomènes a été entreprise par différents auteurs [BOYD, 1972; ARCHER, 1987 et 1989; YAMAMOTO, 1988]. A l'échelle du tronc d'arbre, la modélisation mécanique la plus simple possible du phénomène implique de postuler l'existence d'un changement d'état du bois lors de la maturation source d'apparition de déformations macroscopiques [FOURNIER, 1989]. Ces déformations s'apparentent donc aux dilatations ou contractions thermiques des matériaux, ou aux retraits et gonflements de séchage du bois; le "moteur" de la déformation n'est cependant ni la température, ni l'humidité qui sont des phénomènes d'origine externe, mais une autre variable d'état physico-chimique, l'état de "maturation" qui elle est un phénomène d'origine interne. L'analogie la plus forte est celle d'un matériau tel qu'une colle ou résine qui se rétracte en polymérisant, le retrait étant au premier ordre proportionnel au degré de polymérisation. On notera à ce stade, que les coefficients de déformations de maturation sont une caractéristique rhéologique intrinsèque du matériau bois, alors que les contraintes internes sont une caractéristique de la structure, le tronc d'arbre, sollicitée par le processus de maturation.

Lors de l'abattage et ultérieurement lors du débit et compte tenu du temps de stockage de l'avivé, une grande part de ces contraintes internes sont relaxées, entraînant suivant les cas la présence ou non de gerces ou de fentes plus ou moins visibles sur le bois vert. Outre les manifestations immédiates, intenses et souvent brutales, les contraintes de croissance achèvent ultérieurement leur relaxation par des déformations plus lentes des bois débités pendant leur stockage. On remarque qu'une importante potentialité de déformation subsiste, même dans des pièces de petites dimensions, de bois vert fraîchement abattu. Notons ici qu'il faut éviter de confondre les contraintes de croissance (ou plutôt ce qu'il en reste) et leurs effets, avec une autre famille de contraintes internes

et les déformations qui leur correspondent, nous voulons parler des phénomènes liés au départ de l'eau: le séchage entraîne un cortège de distorsions géométriques, de changements de dimensions fortement anisotropes, de ruptures (fentes), d'effondrements locaux (collapse; surtout chez les Eucalyptus) dont le mécanisme ne doit rien aux contraintes de croissance, mais dont les effets s'additionnent.

II.2 - Les techniques d'investigation des contraintes de croissance.

Les premiers auteurs qui ont décrits ces phénomènes se sont attachés à la description du champ des contraintes dans un tronc. Des méthodes de mesure ont alors été mises au point pour évaluer le champ de contraintes initial dans une pièce à partir des mesures de déplacements et de déformations résiduelles observables après découpe et à partir de mesures ou d'évaluations locales de modules d'Young. Ces méthodes d'évaluation s'avèrent entièrement **destructives** c'est à dire qu'elles impliquent l'abattage de l'arbre étudié. Elles sont souvent longues, fastidieuses et délicates à réaliser. Cependant elles permettent une cartographie d'une ou plusieurs composantes d'un champ de déformations résiduelles sur une grume. Toutes les méthodes de découpes successives utilisent un calcul automatique pour la reconstitution du champ de contraintes. Les principales méthodes utilisées sont les suivantes:

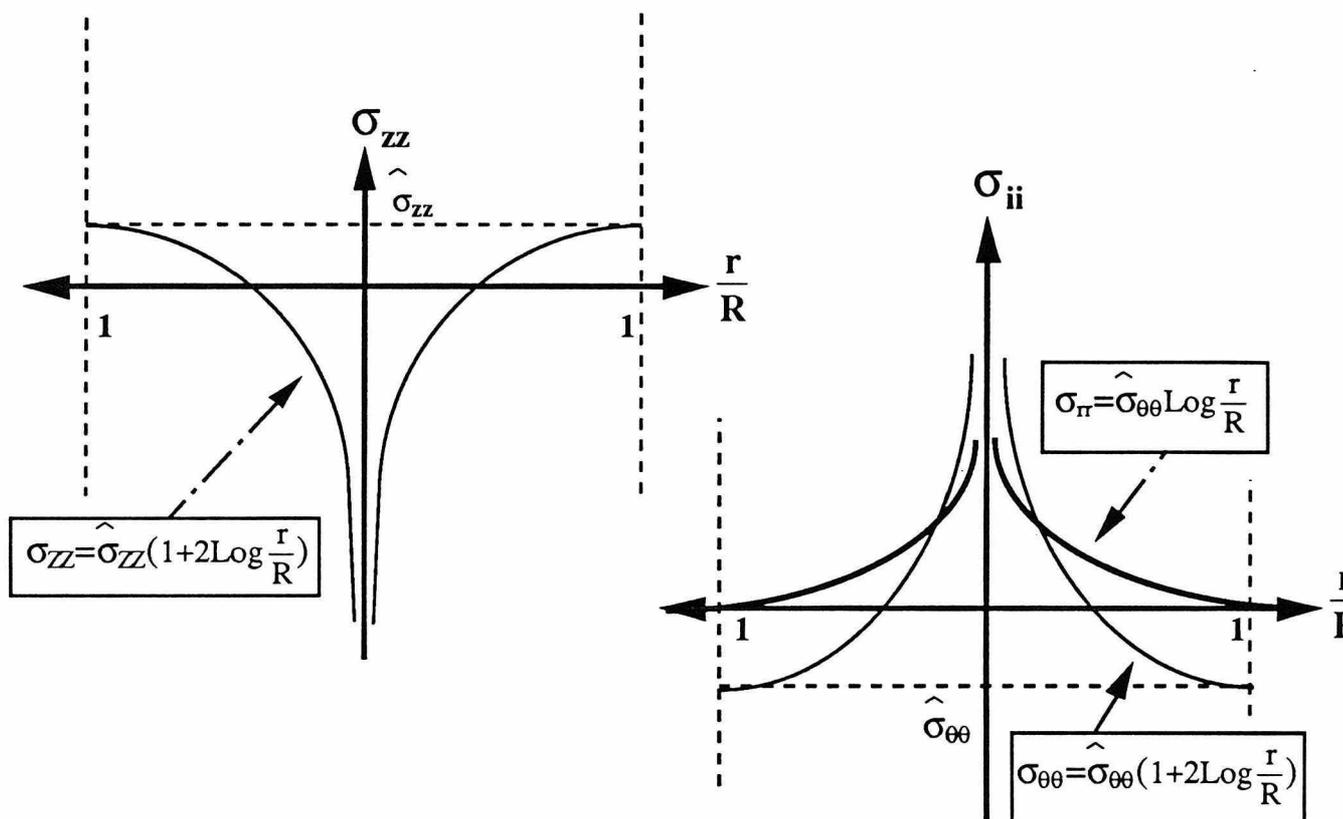
- JACOBS [1938] puis GIORDANO et al. [1969] et GUENEAU [1973] utilisèrent les rayons de courbure et les changements de longueur des lattes découpées dans une planche diamétrale pour évaluer le champ initial de contraintes longitudinales. GUENEAU [1973] utilisa également une série de jauges d'extensométrie disposées sur la largeur d'une planche diamétrale pré-découpée non détachée de la grume qu'on sépare ensuite pour lire les déformations enregistrée sur un diamètre de la tige.

- BOYD [1950] utilisa une méthode qui consiste à creuser une fenêtre rectangulaire (45cm longitudinalement, 6cm tangentiellement et jusqu'à la moelle) dans une grume et à installer des jauges (mécaniques) sur une des faces longitudinale-radiales de cette fenêtre. Ensuite on découpe la grume en rondelles en partant d'une extrémité et en se rapprochant de plus en plus près de la fenêtre, et on lit les jauges après chaque découpe. La lecture finale donne la valeur de la déformation potentielle longitudinale à chaque distance de la moelle où une jauge a été installé. Cette méthode ne donne qu'une médiocre évaluation du champ de contrainte longitudinale.

- CHARDIN [1980] a imaginé une machine sur laquelle on place une grume (de 2,5m de long environ) en position verticale et qui en assure la découpe en de nombreuses lattes longitudinales grâce à deux scies circulaires jumelées. Lors de la découpe de chaque latte un micromètre effectue plusieurs mesures de déformation longitudinale qui sont enregistrées par un microprocesseur. A la fin du processus un programme de calcul automatique permet de calculer le champ initial des déformations. Les hypothèses nécessaires pour la réalisation de ces calculs peuvent être vérifiées grâce à quelques mesures supplémentaires lors de la découpe. Les mesures transverses sont possibles mais la précision des résultats reste réduite. Cette méthode est de loin la plus sophistiquée et la plus riche d'enseignements sur le champ des contraintes de croissance dans tout le volume d'une grume. En particulier, elle donne tous les éléments nécessaires à l'étude par simulation du tronçonnage et du sciage des grumes.

- SASAKI [1981] calcule les contraintes résiduelles de croissance dans un billon par une méthode de forage. Le principe est de déterminer les contraintes résiduelles radiales, tangentielles et longitudinales en fonction des déformations mesurées expérimentalement sur plusieurs endroits de la surface extérieure du billon (considéré comme un cylindre hétérogène et anisotrope) au cours de forages successifs (application de la méthode de SACHS aux tiges ligneuses).

Ces études montrent une certaine adéquation entre les mesures et un modèle de la distribution du champ de contraintes dans une section droite à deux paramètres, proposé par KUBLER en 1959, à partir de considérations d'équilibre, où les contraintes longitudinales et les contraintes transverses sont découplées: voir Figure II.2.



Modèle de KUBLER

FIGURE II.2

Cependant, les écarts au modèle sont importants et souvent systématiques : les déformations résiduelles enregistrées témoignent rarement d'une symétrie de révolution autour de l'axe de la grume, les niveaux de contraintes près du cœur n'atteignent jamais un ordre de grandeur aussi élevé que ceux prédits par le modèle, les contraintes radiales évaluées sont plus faibles et n'atteignent pas leur maximum près du cœur, l'incertitude subsiste sur l'ordre de grandeur des contraintes de cisaillement jamais mesurées et supposées nulles dans les directions principales r, θ, z . Quelques auteurs s'attachent à ces particularités [ARCHER 1974, 1976, 1979, 1981, 1985, BECK 1974, GILLIS 1979, POST 1979], mais le modèle paraît technologiquement suffisant.

La question est moins alors de décrire les profils de contraintes que d'évaluer et prévenir les risques face à un individu ou un peuplement. Pour y répondre, l'idée est alors de retenir comme indicateur du niveau des contraintes, une ou quelques grandeurs simples et rapides à mesurer sur le terrain et de façon **non fatale** pour l'arbre, et de mettre en œuvre, sur de grandes populations, des programmes d'étude des relations entre ces grandeurs et des paramètres physiques, anatomiques, dendrométriques, sylvicoles, génétiques ...

De ce fait, différents chercheurs se sont attachés à mettre au point des méthodes non fatales dans le but d'enregistrer simplement et rapidement un grand nombre de données périphériques sans pour autant infliger aux arbres et aux peuplements un traumatisme tel que le gestionnaire refuse systématiquement ce genre de traitement. Suivant les grandeurs retenues des techniques différentes sont utilisées:

- des mesures de déplacements (par capteurs extensométriques) résultant de la perturbation du champ des contraintes par perçage d'un trou [MARIAUX 1982, ARCHER 1978, 1986], c'est la méthode du trou unique.

- des mesures de déformations résiduelles en des points isolés de la structure supposés passer de l'état pré-contraint à un état naturel: déformation résiduelle longitudinale et courbure de petits échantillons prismatiques découpés dans l'aubier à la surface du tronc [NICHOLSON 1971, GUENEAU 1971, OKUYAMA 1983, CHARDIN 1986], déformations résiduelles longitudinales et parfois tangentielles liée à une découpe autour du point de mesure - deux trous [SAURAT 1976] ou rainure [équipe ASMA] -, mesurées par des jauges de déformations (GUENEAU 1973, KIKATA 1972) ou des capteurs extensométriques [FERRAND 1982, GUENEAU 1974], collés ou positionnés sur le bois du tronc après écorçage. Ces méthodes qui donnent en général des résultats précis et faciles à interpréter sont les plus répandues, elles ont cependant l'inconvénient, plus que les autres types de mesure, de demander une bonne pratique si l'on veut obtenir des résultats fiables.

- la dimension tangentielle d'une carotte de sondage extraite par une tarière de 5 mm. Les travaux menés à la Station Qualité des Bois de Nancy [POLGE et THIERCELIN 1979, FERRAND 1982] ont en effet montré qu'il existe une corrélation statistique significative entre cette grandeur et la déformation longitudinale résiduelle évaluée par les techniques décrites ci-dessus. Cependant les résultats restent peu fiables: plus de 50% de la variance des mesures du diamètre de la carotte n'est pas expliquée par la déformation résiduelle longitudinale. Il reste que la méthode présente l'avantage d'être la moins destructive et sur le terrain la plus facile à mettre en œuvre.

Enfin un cas particulier dans ce paragraphe sont les études menées en Australie sur *Eucalyptus regnans* [NICHOLSON 1971b] et en Afrique du Sud sur *Eucalyptus grandis* [MALAN 1984] qui montrent une excellente corrélation entre le niveau des contraintes périphériques de maturation et l'extension des fentes en bout. Ces résultats ont permis aux chercheurs d'Afrique du Sud de considérer la moyenne des évaluations des fentes en bout sur chaque arbre (à différentes hauteurs) comme un paramètre indirect unique, raisonnablement fiable et pratique pour l'évaluation du niveau de contrainte dans l'arbre. Cette technique permet uniquement l'analyse de peuplements entiers. Il faut cependant rester très prudent sur l'utilisation d'une telle technique puisque la relation contrainte de croissance <---> fente en bout fait intervenir beaucoup de paramètres mécaniques, géométriques et d'abattage non directement liés au niveau de contrainte de croissance.

II.3 - Quelques ordres de grandeur, signification

L'ordre de grandeur des déformations de maturation notées α , évaluées par la mesure de déformations résiduelles notées ϵ^* , données par différents auteurs [Synthèse dans KUBLER 1987, ou ARCHER 1986] est de 10^{-3} (=0,1%), ϵ^*_{LL} est généralement négatif (sauf bois de compression) et ϵ^*_{TT} positif. Les déformations sont comptées positivement si elles correspondent à un retrait. Dans ce cas, elles sont induites par une contrainte de tension. Inversement, elles sont comptées négativement dans le cas contraire: un allongement correspond à une contrainte de compression. Peu de mesures ont été effectuées dans la direction tangentielle [SASAKI et al. 1978; ARCHER 1986; THIERCELIN 1978 rapporté par FERRAND 1981; LANGBOUR 1988 et équipe ASMA sur wapa et châtaignier], qui montrent que ϵ^*_{TT} est toujours de signe opposé à ϵ^*_{LL} , dans un rapport moyen de 2, soit des contraintes induites à la surface longitudinales ($\sigma^*_{LL} = E_L \epsilon^*_{LL}$ et $E_L = 10.000$ MPa) de l'ordre de 10 MPa, tangentielles de 1 MPa. Les méthodes qui ont été mises au point pour mesurer à la périphérie des arbres les déformations longitudinales ϵ^*_{LL} et tangentielles ϵ^*_{TT} résultent du relâchement des contraintes préexistantes. Puisque ϵ^*_{TT} est supérieur à $-\nu_{LT} \epsilon^*_{LL}$ (ν est le coefficient de Poisson), cela implique que les dernières couches de cellules du bois appartenant à la structure sur pied, sont soumises à une tension longitudinale et à une compression tangentielle (gonflement transversal dû à la maturation cellulaire ou à un problème d'encombrement des cellules sur la périphérie). Cet état de contraintes est bénéfique pour l'arbre sur pied car dans l'aubier (voir courbes du modèle de KUBLER), la compression tangentielle inhibe la propagation de fentes externes dues au gel, à la sécheresse ou d'autres facteurs externes et permet la fermeture des blessures, la tension longitudinale limite les risques de rupture en compression en cas de moment fléchissant induit par un vent violent (la résistance à la rupture étant inférieure en compression qu'en tension).

De plus, le comportement du bois à la maturation n'est jamais homogène sur la circonférence d'un tronc, les déformations mesurées présentent une forte dissymétrie : sur une même couronne, en quatre points en quadrature, on observe (essais préliminaires de l'équipe ASMA sur wapa et châtaignier) des déformations longitudinales croissant progressivement de $-2,3 \cdot 10^{-4}$ à $-2,4 \cdot 10^{-3}$. Cette hétérogénéité est particulièrement sensible en présence de bois de réaction dont la structure, et notamment l'ultrastructure (couches S2 et S3 de la paroi secondaire, angle des microfibrilles dans S2), est très différente de celle du bois dit "normal". Ces considérations vont donc conduire à une analyse micro-mécanique du phénomène pour comprendre comment des variations importantes de l'ultrastructure conduisent à des variations importantes de la grandeur macroscopique α_{LL} . Dans le bois de tension, α_{LL} est un retrait beaucoup plus fort que dans le bois normal du fait la cristallisation de la cellulose des microfibrilles très peu inclinées dans la couche G et de l'épaisseur des parois [OKUYAMA et KIKATA 1981]. Cela permet de mettre en évidence des corrélations significatives entre α_{LL} et la présence de bois de tension [LENZ et STRÄSSLER 1959 sur du Hêtre, NICHOLSON et al. 1975 sur Eucalyptus, TRENARD et GUÉNEAU 1975 sur du Hêtre], ainsi qu'entre α_{LL} et densité du bois lorsque l'échantillonnage comporte du bois de tension plus dense et du bois normal [BOYD 1972 sur Eucalyptus; LANGBOUR 1989 sur Peuplier].

Ces corrélations sont moins significatives sur un groupe d'individus que sur un seul arbre: il est délicat de déterminer pour une essence un seuil de déformation de maturation qui ne pourrait être dépassé que par la formation de bois de tension. Aucune tendance caractéristique du "bois" sans spécification d'essence, de milieu ... ne peut apparemment être dégagée, ce qui n'est pas surprenant compte tenu de la grande variabilité des déformations mesurées dans le bois normal et des structures possibles très différentes de bois de tension: couche G plus ou moins nette, parfois absente, supplémentaire, remplaçant S3 ou S2 et S3 ..., teneurs en cellulose cristalline et en lignine variables.

Finalement, un ordre de grandeur des variations possibles des déformations de maturation dans le bois de tension et à l'intérieur d'un même individu pourrait être de -10^{-3} à $-4 \cdot 10^{-3}$ à comparer aux valeurs dans le bois normal de -10^{-4} à -10^{-3} .

II.4 - Evaluation expérimentale des déformations de maturation à la surface de l'arbre sur pied

On ne mesure pas directement les composantes du tenseur des déformations de maturation noté $\underline{\alpha}$ mais des déformation résiduelles notées ϵ^* . En effet, les coefficients de déformations induites sont des grandeurs rhéologiques qui doivent être évaluées expérimentalement. Si le moteur de déformations était une variable d'état, telle que la température ou l'humidité, contrôlable sur de petits échantillons qui se déforment librement, $\underline{\alpha}$ serait estimé par la mesure des variations dimensionnelles de ces petits échantillons. Or, nous ne savons pas pour l'instant provoquer et observer la maturation du bois sur éprouvettes détachées de l'arbre. Le paramètre $\underline{\alpha}$ se déduit donc indirectement des mesures de déformations relâchées à la surface des arbres en utilisant un modèle.

Lorsqu'on enregistre, dans les couches externes, les déformations résiduelles longitudinales ϵ^*_{LL} et tangentielles ϵ^*_{TT} dues à la libération des contraintes élastiques autour du point de mesure, $\underline{\partial \epsilon^*}$ est supposé représenter les déformations dans la dernière couche d'épaisseur dR résultant du passage de l'état précontraint $\underline{\partial \sigma}(R_f, \theta, z, R_f)$ dû à sa maturation récente, à un état naturel non contraint. En utilisant la loi de comportement élastique du bois dans cette couche et le fait que la composante radiale σ_{RR} est nulle (déformation non contrariée à la maturation) à la surface libre du tronc, il vient :

$$\epsilon^*_{TT} = S_{22} (-\partial \sigma_{TT}) + S_{23} (-\partial \sigma_{LL}) \quad (1)$$

$$\epsilon^*_{LL} = S_{23} (-\partial \sigma_{TT}) + S_{33} (-\partial \sigma_{LL}) \quad \text{puisque } \sigma_{RR}(R_f, \theta, z, R_f) = 0$$

Or à la surface $r=R_f$ (rayon final au temps t), on peut postuler que l'état des contraintes ne résulte que de la maturation de la dernière couche donc $\underline{\underline{\sigma}}(R_f, \theta, z, R_f) = \underline{\underline{\partial\sigma}}(R_f, \theta, z, R_f)$, et d'après la loi de comportement élastique du bois:

$$\begin{aligned} S \underline{\underline{\partial\sigma}}(R_f, \theta, z, R_f) &= \underline{\underline{\partial\varepsilon}}(R_f, \theta, z, R_f) - \underline{\underline{\alpha}}, && \text{ou encore:} \\ S_{22} (\partial\sigma_{TT}) + S_{23} (\partial\sigma_{LL}) &= \partial\varepsilon_{TT} - \alpha_{TT} && (2) \\ S_{23} (\partial\sigma_{TT}) + S_{33} (\partial\sigma_{LL}) &= \partial\varepsilon_{LL} - \alpha_{LL} \end{aligned}$$

où, selon les définitions introduites au paragraphe précédent, $\partial\varepsilon_L$ et $\partial\varepsilon_T$ sont les déformations tangentiels et longitudinaux qui se sont produites dans l'arbre dans la nouvelle couche au moment de sa maturation. Cette expression signifie simplement que les contraintes qui sont apparues sont dues à la partie "gênée" des déformations α_{LL} et α_{TT} , qui n'a pu s'exprimer librement lors de la maturation du fait de l'effet du tronc interne massif.

De (1) et (2), on déduit :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{LL}^* &= \alpha_{LL} - \partial\varepsilon_L && (3) \\ \varepsilon_{TT}^* &= \alpha_{TT} - \partial\varepsilon_T \end{aligned}$$

On peut encore dire que les déformations résiduelles enregistrées lors de la libération des contraintes internes à la surface de l'arbre sont la différence entre la tendance naturelle originelle du matériau, c'est à dire les déformations de maturation et la partie de cette tendance qui n'a pas été gênée lors de la maturation. Donc $\underline{\underline{\partial\varepsilon}}(R_f, \theta, z, R_f)$ sont les déformations à la surface de l'arbre dues à la maturation de la couche externe, supposons que le tronc interne soit suffisamment massif ($dR \ll R$) et rigide pour que les déformations réelles $\partial\varepsilon_{LL}$ et $\partial\varepsilon_{TT}$ soient petites par rapport aux déformations induites α_{LL} et α_{TT} , ce qui est vérifié [FOURNIER 1989] dans la plupart des cas sauf sur de très jeunes arbres:

$$\begin{aligned} (3) \text{ devient } \alpha_{TT} &= -S_{22} \partial\sigma_{TT} - S_{23} \partial\sigma_{LL} = \varepsilon_{TT}^* \\ \alpha_{LL} &= -S_{23} \partial\sigma_{TT} - S_{33} \partial\sigma_{LL} = \varepsilon_{LL}^* \end{aligned}$$

alors la mesure des déformations résiduelles donne directement accès aux grandeurs rhéologiques cherchées α_{LL} et α_{TT} : celles-ci ont été "entièrement contrariées" lors de la maturation de la dernière couche d'épaisseur très mince "collée" sur un xylème massif, on les observe intégralement lorsqu'on relâche les contraintes induites. Cette mesure, répétée en plusieurs points de la circonférence, permet alors naturellement d'évaluer par lissage le profil $\alpha_{LL}(\theta)$, $\alpha_{TT}(\theta)$. Cependant α_{RR} reste une grandeur inconnue. Le calcul montre (ARCHER et BYRNES, 1974, op. cit.; FOURNIER, 1989, op. cit.) que dès lors que les hypothèses ci-dessus (tronc interne suffisamment gros et rigide) sont satisfaites, α_{RR} n'est pas gênée (l'épaisseur de nouvelle couche externe varie librement lors de sa maturation) et n'influence donc pas les distributions de contraintes $\underline{\underline{\partial\sigma}}$. Il reste que cette mesure de déformations résiduelles à la surface des arbres ne donne qu'une information sur l'état des contraintes et sur $\underline{\underline{\alpha}}$ à la surface; à l'intérieur du tronc, l'état des contraintes est influencé par toutes les maturations successives depuis le début de la croissance secondaire. La distribution des contraintes à l'instant final sera défini par la donnée de $\underline{\underline{\alpha}}$ dans toute la grume. Faute de disposer de mesures non traumatisantes dans le temps, $\underline{\underline{\alpha}}$, caractéristique du matériau bois, est donné, jusqu'à présent, par des modèles prévisionnels en fonction de paramètres anatomiques mesurables sur échantillons prélevés dans le tronc final (par exemple l'angle des microfibrilles) [FOURNIER 1989]. C'est un des volets de l'étude présentée ici et fera l'objet d'une série de mesures afin de valider ou non les modèles théoriques proposés par différents auteurs; nous y reviendront plus loin.

D'un point de vue métrologique, les observations antérieures ont montré:

- que les directions principales de σ (ou de α) sont proches des directions de symétrie matérielle \underline{T} , \underline{L} du matériau (i.e. $\sigma_{TL} \approx 0$),

- que σ_{LL} est de l'ordre de quelques MPa, positive dans le bois normal (tension) avec des valeurs élevées dans le bois de tension (plusieurs dizaines de MPa), et négatives dans le bois de compression, alors que σ_{TT} est de l'ordre de quelques dixièmes de MPa

- ce qui implique que α_{LL} est positive de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} dans le bois normal avec des valeurs souvent supérieures à 10^{-3} dans le bois de tension, et négative, parfois inférieure à -10^{-3} dans le bois de compression; α_{TT} est de l'ordre de -2 fois α_{LL} , ordres de grandeur qu'il est utile de retenir pour la mise au point des techniques de découpe, le choix du matériel d'extensométrie, et le dépouillement des mesures.

Notamment, en supposant qu'aucun effort ne s'exerce sur une facette orientée selon R, donc $\sigma_{RR} = \sigma_{RL} = \sigma_{RT} = 0$ (l'état des contraintes est dit "plan") mais aussi $S_{24} = S_{34} = S_{42} = S_{43} = 0$, et $S_{32} \approx -S_{33}/2$ (les S_{ij} sont les complaisances élastiques) comme $\sigma_{TT} \approx -\sigma_{LL}/10$ alors:

$$\alpha_{LL} = - [S_{32} \sigma_{TT} + S_{33} \sigma_{LL}] \approx - S_{33} \sigma_{LL} \quad (\text{car } S_{32} \sigma_{TT} \approx 0,05 S_{33} \sigma_{LL} \ll S_{33} \sigma_{LL})$$

Dans la direction longitudinale, l'état des contraintes et des déformations suit une loi unidirectionnelle: compte tenu du faible ordre de grandeur des contraintes tangentielles, la déformation α_{LL} est avec une approximation inférieure à 5% directement proportionnelle à la contrainte σ_{LL} .

Attention, ce raisonnement ne se transpose pas à la direction tangentielle car la valeur élevée de σ_{LL} , se traduit par d'importantes déformations tangentielles, $S_{23} \sigma_{LL}$, induites par effet Poisson :

$$\alpha_{TT} = - S_{22} \sigma_{TT} \left[1 + \frac{S_{23}}{S_{22}} \frac{\sigma_{LL}}{\sigma_{TT}} \right] \approx - S_{22} \sigma_{TT} [1 + 0.03 \times 10] \approx - S_{22} \sigma_{TT} (1,3)$$

Lorsqu'on mesure une déformation longitudinale ε^*_{LL} entre l'état initial σ et un état final σ' tel que $\sigma'_{LL} \approx 0$, ε^*_{LL} peut être interprétée comme :

$$\varepsilon^*_{LL} = S_{32} (\sigma'_{TT} - \sigma_{TT}) + S_{33} (-\sigma_{LL}) = - S_{33} \sigma_{LL} \left(1 + \frac{S_{32}}{S_{33}} \frac{\sigma_{TT} - \sigma'_{TT}}{\sigma_{LL}} \right)$$

Si σ'_{TT} reste faible, de l'ordre de σ_{TT} , comme le coefficient de Poisson $-S_{32}/S_{33}$ est de l'ordre de 0.5, le terme correctif $\frac{S_{32}}{S_{33}} \frac{\sigma_{TT} - \sigma'_{TT}}{\sigma_{LL}}$ est donc inférieur à $\frac{1}{10}$

On peut alors affirmer, en faisant une erreur de moins de 10%, que la mesure de ε^*_{LL} donne une estimation de σ_{LL} , par la loi de comportement unidirectionnelle $\sigma_{LL} = \varepsilon^*_{LL} / S_{33}$.

II.5 - Principaux résultats expérimentaux d'ensemble

Il ressort des programmes d'étude sur de nombreux échantillons et individus à partir de méthodes de mesures périphériques non fatales:

- que chaque essence semble être caractérisée par un niveau de contrainte moyen [KUBLER 1987a] mais avec un écart type très important; la variabilité, même au sein d'un même clone, reste grande [WAUGH 1972, NEPVEU et al.1985].

- que la sylviculture est déterminante [FERRAND 1981, KUBLER 1987b], mais qu'au sein d'un peuplement d'espèce relativement homogène, la variabilité entre individus peut rester très importante.

- que l'ordre de grandeur des déformations périphériques mesurées est lié à la présence de bois de réaction, bois de structure et donc de propriétés physiques et mécaniques différentes du bois "normal", que l'on trouve sur un secteur angulaire de la section droite, principalement dans les arbres flexueux ou inclinés, et qui, parce qu'il introduit une hétérogénéité du matériau dans les pièces usinées, nuit à la mise en œuvre. Sur les feuillus, une déformation longitudinale négative importante est un indicateur de la présence de bois de "tension", alors que sur les résineux, une déformation longitudinale positive est souvent un indicateur de bois de "compression".

Dans son étude bibliographique KUBLER [1987a et 1987b] pense qu'il n'est pas possible de prévenir les contraintes de croissance, mais que leurs effets extrêmes peuvent être évités en suivant quelques principes simples mais pas toujours économiquement viables. Les arbres génèrent de relativement fortes contraintes dans le but de courber les tiges et les branches dans une position plus favorable pour leur croissance (dissymétrie sur une circonférence et niveau moyen des contraintes). On peut contrôler les contraintes de croissance en ne donnant à l'arbre aucune raison de se réorienter, c'est à dire en fournissant des conditions de croissance stables. Dans ce but les arbres devraient avoir un éclairage suffisant et uniforme, et, là où la lumière est faible comme en sous-étage, les changements d'éclairage sur une face doivent être évités. En particulier, la répartition spatiale des arbres dans un peuplement devrait être uniforme (le couvert et la stratification): les forêts irrégulières (au sens sylvicole) sont préférables aux plantations régulières et équiennes. Les peuplements devraient être éclaircis doucement, fréquemment et uniformément, plutôt que de manière hasardeuse après de longues périodes. Dans les régions ayant de forts vents dominants, des espacements faibles peuvent minimiser les contraintes, tandis que sur les pentes abruptes de plus forts espacements apparaissent préférables.

J.C. FERRAND [1981] a étudié, à partir de la méthode de mesure sur carottes de sondage, la variation des contraintes de croissance (déformation résiduelle longitudinale ϵ^*_{LL}) à la périphérie de troncs de hêtres en forêt:

- En moyenne, la déformation est maximale du côté tendu et décroît très rapidement lorsqu'on s'éloigne de celui-ci. Dans un même peuplement ϵ^*_{LL} augmente avec l'inclinaison du tronc, tandis qu'elle diminue légèrement avec la surface du houppier.

- Le module d'Young longitudinal E_L varie comme ϵ^*_{LL} du côté tendu, ce qui fait augmenter encore la contrainte longitudinale et la dissymétrie des déformations pendant le sciage pour les arbres les plus contraints.

- Dans une même forêt, il a trouvé que les arbres à fibre torse possèdent sur la surface tendue une déformation potentielle longitudinale locale (ϵ^*_{LL}) de 30% plus forte que les arbres de droits fil, et un module d'Young E_L de 20% plus élevé. Cependant, ils ne renferment ni plus ni moins de fibres de bois de tension.!

- En comparant sur des peuplements âgés quatre types de station et deux traitements sylvicoles dans le Nord-Est de la France, il a montré que la déformation ϵ^*_{LL} diminue fortement lorsque la surface moyenne du houppier augmente; cette variation est continue pour des surfaces de houppier allant de 20 à 110 m² ! C'est par conséquent la sylviculture passée (et non pas la station) qui semble responsable des contraintes de croissance élevées de certaines forêts de hêtre.

J.C. FERRAND [1981] a également réalisé environ 550 mesures de contraintes de croissance sur *Eucalyptus delegantensis* et *Eucalyptus nitens* dans des essais d'espacements à la plantation et d'éclaircie situés à proximité de Melbourne (Victoria, Australie). Il en ressort que, au même âge, plus l'espacement entre les arbres est grand plus les contraintes sont faibles. La sylviculture est donc un moyen très efficace pour diminuer les contraintes de croissance. Elles sont aussi plus faibles là où la hauteur dominante est plus grande. Les résultats montrent qu'il est possible de prédire quel niveau de contraintes de croissance résultera d'une sylviculture donnée dans une station donnée.

Nous avons vu que la variation du paramètre maturation est donc régie par des processus biochimiques et physiologiques et ne peut pas être créée et mesurée par l'expérimentateur sur petits échantillons. Ce paramètre est donc une variable interne, qui représente un concept nécessaire pour interpréter certains phénomènes, mais qui n'est observable qu'à travers ses effets mécaniques dans l'arbre. Il sera donc déterminé indirectement dans la structure tronc in situ, par la mesure des déformations résiduelles résultant de la libération des contraintes internes à la périphérie de l'arbre. Afin de reconstituer l'état mécanique de la structure arbre il est nécessaire de se doter d'un outil d'analyse mécanique qui permet de décrire le modèle d'apparition des contraintes internes, dépendant non seulement de la loi de comportement mais aussi du problème particulier considéré (géométrie de la structure, profil de variation du paramètre).

III - UN OUTIL MECANIQUE D'ANALYSE DES CONTRAINTES DE CROISSANCE

Les recherches entreprises ici sont orientées sur la compréhension de la mise en place de l'état mécanique du bois dans l'arbre, c'est à dire, en d'autres termes, sur l'histoire de la mise en place des contraintes de croissance en liaison avec la morphologie de l'arbre et l'anatomie du bois. Elles ont donc pour objectif de mieux comprendre l'origine de ces défauts (pour l'utilisateur) ou singularités rapportés à la croissance de l'arbre. Les manifestations des contraintes de croissance lors de la première transformation ont été décrites par GUENEAU [1973] d'une excellente manière, dans le paragraphe suivant nous allons donner une description schématique des phénomènes mécaniques en cause à la lumière des derniers travaux sur ce sujet effectués par Meriem FOURNIER et Daniel GUITARD. Dans la suite de ce chapitre nous reprenons les principes généraux et les principaux résultats de leurs travaux.

L'étude des contraintes de support et des contraintes de maturation a permis à Meriem FOURNIER [1988a, 1988b, 1989a, 1989b, 1990a, 1990b, 1990c, 1991] de clarifier la notion de contraintes de croissance, en mettant au point un outil de calcul indispensable pour simuler le processus d'accumulation de ces contraintes internes et analyser tant les résultats expérimentaux des campagnes de mesures que les conséquences de telle ou telle hypothèse sur les différents épisodes du fonctionnement d'une tige en croissance. Nous nous appuyons par la suite sur ce modèle pour interpréter nos résultats et raisonner en fonction des situations rencontrées.

Le principe de l'étude théorique est de connaître l'état des contraintes dans une section d'un tronc d'arbre de rayon R_f , dont le bois s'est formé et est devenu mature par couches concentriques successives d'épaisseur dR , entre un état initial de rayon faible R_i , et l'état final de rayon R_f . Le problème étant posé sur une structure évolutive en croissance, demande une analyse pas à pas (entre R et $R+dR$), puis la superposition de ces étapes élémentaires.

Un programme de calcul a été écrit (FOURNIER, 1989; FOURNIER et al., 1990a) qui permet le calcul de toutes les contraintes à l'intérieure d'une section droite d'une tige à partir d'une formulation discrétisée du problème. Ce logiciel de calcul semi-analytique, qui donne les résultats sous la forme d'un fichier "position - contraintes" en chaque point r_Q situé au centre de chaque couche Q , est un complément aux formulations analytiques proposées par KUBLER (1959 a et b) d'une part (qui postule la symétrie de révolution du problème, ainsi que l'isotropie transverse du matériau), par ARCHER et BYRNES, (1974), et ARCHER (1976, 1986 a) d'autre part. Il permet en effet de simuler des variations radiales très générales (de la fibre torse, du comportement élastique et du comportement à la maturation) dont l'étude est au cœur des préoccupations actuelles des recherches sur la qualité des bois (par exemple le bois juvénile des essences à croissance rapide).

Parmi les résultats les plus importants acquis grâce à ces outils de simulation numérique et à certaines vérifications expérimentales il faut signaler:

- le très faible niveau de contraintes de support partout en périphérie d'une tige [FOURNIER 1991], là où le bois est très jeune donc sollicité depuis peu de temps, quelle que soit son inclinaison (nous le montreront sur un cas réel au cours de notre étude), ce qui tend à exclure le niveau de contrainte auquel est soumis un tissu en formation comme facteur déclenchant l'apparition de bois de réaction. D'autre part, la localisation à l'intérieur de la tige et le niveau de chargement des parties les plus tendues ou comprimées ne dépend pas seulement de l'état actuel observable mais de toute l'histoire de l'arbre. Les notions intuitives de "face tendue ou comprimée" sont donc à reconsidérer. Dans la plupart des cas, nous pouvons admettre que la distribution des contraintes de maturation donne l'allure et l'ordre de grandeur des contraintes de croissance dans l'arbre et des contraintes résiduelles dans la grume (loin des extrémités en l'absence de fentes d'abattage), et réciproquement. Il faut cependant se garder d'interprétations trop précises notamment lorsque les déformations sont faibles (0,01%).

- la démonstration numérique du découplage très important entre la direction longitudinale et les deux directions transversales, ce qui permet, en ce qui concerne les contraintes longitudinales, d'utiliser un calcul de section droite unidirectionnel, excessivement plus simple et plus rapide.

- l'utilisation de cette possibilité pour prendre en compte des propriétés intrinsèques (évaluables par des essais usuels) de toutes les tiges: les variations radiales lentes (passage bois juvénile<--->bois adulte par exemple) ou rapides (bois initial/bois final) et tangentiels (zones de bois de réaction par exemple) des propriétés (anatomie, densité, retrait, constantes élastiques du bois vert, déformations résiduelles à la surface de l'arbre sur pied) et des niveaux de contraintes internes du bois. Les contraintes de maturation peuvent alors être étudiées en superposition aux contraintes de support dues au poids propre de l'arbre [FOURNIER 1991] et aux contraintes d'abattage dues à la suppression de ce houppier. Cette superposition montre que la distribution des contraintes de maturation détermine en général la répartition et l'ordre de grandeur des efforts supportés par le bois de l'arbre sur pied ou d'une grume mais qu'il convient de rester prudent pour des interprétations particulières. Cela conduit notamment à prévoir des distributions de contraintes de croissance très différentes du modèle classique de KUBLER, certainement plus réalistes et proches de différents résultats expérimentaux exposés dans la littérature. Nous ne montrons pas ici ces distributions puisque chaque cas est particulier et demande l'exposé de tous les paramètres employés [FOURNIER 1989, 1990 et 1991].

IV - LE CHAMP D'EXPERIMENTATION

IV.1 - Présentation

La culture industrielle de l'Eucalyptus au Congo est directement issue de l'application des résultats de la recherche forestière locale: ce sont les travaux du Centre Technique Forestier Tropical engagés au Congo depuis 1958. Après le choix des espèces et des provenances adaptés, puis la sélection des hybrides les plus performants, la recherche s'est orientée à partir de 1969 sur la multiplication des meilleurs phénotypes par bouturage herbacé. La réussite fût totale en 1974. Il devenait possible de reproduire des arbres sélectionnés à l'âge adulte, à condition de partir des rejets de souche après abattage. Depuis, les tests clonaux ont permis la sélection de clones performants et le passage à l'étape industrielle est devenu réalité en 1978 (date de la création de l'U.A.I.C.). Au départ l'objectif d'une grande industrie de pâte chimique s'est alors révélé trop ambitieux et, surtout, trop précoce. La nécessité de diversifier les débouchés s'est rapidement imposée aux responsables. Les exploitations qui ont démarré en 1987 avec la réalisation de 2500 ha de peuplements pour une récolte de près de 200.000 tonnes de bois de qualité export (rondins écorcés de diamètre "fin bout" supérieur à 8 cm), à la révolution de 7 ans. Actuellement l'exploitation concerne environ 3.000 ha par an pour une exportation moyenne de 280.000 tonnes de bois de trituration (~80 tonnes/ha). La productivité moyenne est estimée à 25 m³/ha/an, mais le potentiel est évalué à 35 m³/ha/an. Maintenant, l'UAIC gère environ 40.000 ha de plantations clonales. De plus, il faut signaler la présence sur le site d'une usine d'imprégnation de poteaux de ligne employant des eucalyptus "cueillis" dans les plantations de

l'UAIC et du CTFT mais aussi depuis peu du pin des caraïbes que l'on commence à cloner en vue d'une exploitation industrielle.

IV.2 - L'amélioration génétique des eucalyptus tropicaux

Ce programme concerne à la fois les espèces pures et les formules hybrides. Le principal objectif est de sélectionner les meilleurs géniteurs dans le cas des espèces pures (attention la notion d'espèce est assez "floue" chez ce genre) et les meilleurs formules hybrides. Puis, avec les meilleurs individus (arbres +), on constitue des vergers à graines et on sélectionne les meilleurs clones. Alors qu'ils sont souvent contre-sélectionnés dans les aires naturelles et de ce fait assez rares, les hybrides interspécifiques sont par contre très fréquents dans l'aire artificielle. En tant qu'exotique, le genre *Eucalyptus* fabrique des hybrides interspécifiques d'autant plus fréquents et vigoureux que les milieux utilisés s'écartent davantage de celui des aires naturelles des espèces pures. D'autre part, ils présentent souvent une meilleure adaptation. Au Congo en particulier deux hybrides présentent de forts avantages par rapport aux espèces pures. L'hybridation artificielle permet d'éviter les barrières phénologiques et élargit énormément le champ de la création variétale. Les descendances hybrides peuvent être très homogène ou au contraire très hétérogènes. De même, l'hétérosis de la population peut être très élevé ou au contraire concentré sur quelques individus seulement. Dans ce cas, seule la voie végétative sera efficace pour un usage forestier. Celle-ci est très bien étudiée et réussie au Congo puisqu'elle permet de propager, à grande échelle, les meilleurs individus hybrides. Cependant le passage à l'étape industrielle a exigé de nombreuses mises au point techniques.

Il convient de noter ici que la foresterie clonale pose deux problèmes techniques majeurs: les dangers phytosanitaires (palliatifs actuels: assistance cultural et lutte chimique) et la réduction de la fertilité surtout sur les sols pauvres des savanes plantées (palliatifs actuels: recyclage des écorces, branches et feuilles, et apport d'engrais systématique). Ces deux points sont à suivre très régulièrement et fréquemment sur le terrain.

IV.3 - Le milieu naturel

Les plantations actuelles concernent les savanes et steppes sableuses de la bande côtière aux alentours de Pointe Noire (4°5 sous l'équateur); il s'agit, en fait, de plateaux peu élevés (80m d'altitude) constitués d'une couche de 15m de sable fin ocracé, très filtrant et pauvre (à nappe phréatique éloignée) déposé sur une assise argileuse. Les conditions climatiques générales sont:

- température moyenne annuelle: 25°3
- pluviométrie moyenne annuelle: 1.318 mm en 123 jours
- saison écologiquement sèche, 4 mois de Juin à Septembre
- saison des pluies, chaude, souvent coupée d'une petite saison sèche de 15 à 30 jours
- influence côtière marquée

La végétation naturelle exprime la pauvreté de ces sols sous climat tropical humide de basse altitude: steppe à graminées courtes. Ces plateaux herbeux, annuellement balayés par les feux de brousse sont très peu propices à l'agriculture et à l'élevage; seules, les nombreuses galeries forestières intéressent les petits agriculteurs qui se livrent à la pratique de l'agriculture itinérante après défrichement.

IV.4 - Le matériel végétal de l'étude

Il est constitué uniquement de clones et il provient des plantations:

- expérimentales du CTFT (environ 6000 ha) comprenant plus de 60 espèces d'*Eucalyptus* avec de nombreux tests de provenance, d'hybrides, de clones, des essais de fertilisation, d'espacement....
- industrielles de l'UAIC composées essentiellement des deux hybrides les plus productifs et les mieux adaptés.

Tous les clones choisis (sauf un) pour notre étude appartiennent à deux formules d'hybridations naturelles fortuites qui sont de loin les plus représentés sur le site (à peu près 40 clones provenant de ces deux hybrides couvrent 90% de la surface en production):

- l'hybride "PF1" ou "Platyphylla F1". Il est remarquablement adapté et productif sur ce site. Il présente cependant de nombreux défauts de forme et la sélection clonale doit être forte pour obtenir des individus très droit et sans fourche. La base génétique de cette variété est réduite, pour simplifier ils sont assimilés généralement à des *Eucalyptus alba* x *urophylla* ou *Eucalyptus alba* x *grandis*. *Eucalyptus alba* et *urophylla* sont toutes les deux des espèces très bien adaptées aux conditions de Pointe Noire.

- l'hybride "12 ABL x saligna" ou "12ABL" qui un groupe d'hybrides: *Eucalyptus tereticornis* x *saligna* et *Eucalyptus tereticornis* x *grandis*. La base génétique est à peine plus large que pour le PF1. Les pères appartiennent également à des individus variés et inconnus d'*Eucalyptus saligna* et *grandis* qui sont des espèces mal adaptées, dépérissant rapidement à partir de l'âge de 3 ans (gommose généralisée).

V - PRINCIPES DE L'ETUDE

V.1 - Buts

L'étude des déformations résiduelles longitudinales périphériques de maturation (DRLP) sur du matériel clonal a pour objectifs de mieux cerner les paramètres intrinsèques et déterminants liés aux contraintes de croissance à l'origine de nombreux défauts résultants de la découpe de bois vert. L'originalité de cette démarche se trouve dans l'utilisation de clones parfaitement identifiés et croissant continûment dans un milieu naturel aux conditions quasi-homogènes (puisque les arbres ont tous été choisis sur la même station). De ce fait, à sylviculture identique (écartement, fertilisation, position dans le peuplement) de peuplements réguliers et équiennes, on peut considérer en première approximation, que l'âge est le seul facteur de variabilité à prendre en compte. On peut donc espérer, pour un clone donné, retrouver l'histoire de la mise en place des contraintes de croissance et de ce fait améliorer la compréhension de l'installation de l'état mécanique du bois dans l'arbre, de manière à pouvoir progresser dans les principes d'amélioration, sylvicoles et de sélection des meilleurs individus, hybrides ou espèces, basée sur la qualité du bois

Pour une modélisation idéale sur le plan mécanique des états de contraintes actuels il serait nécessaire de disposer de données sur toute l'histoire d'un individu. Rassembler ces données sur un seul individu est matériellement et techniquement irréalisable compte tenu de la durée de vie moyenne d'un arbre et du traumatisme causé lors de la récolte des données de nature à perturber complètement les mesures ultérieures. Nous ne disposons donc pas actuellement de telles données. En effet les outils de calcul développés jusqu'à présent [KUBLER, ARCHER, OKUYAMA, FOURNIER] sont fondés sur des jeux de données disparates ou des hypothèses fortes.

Le principe de l'étude proposée ici repose sur l'hypothèse suivante: on admettra que des individus de même génotype, dans des conditions édaphiques et climatiques comparables mais d'âges différents (1, ..., n, ..., A années), sont chacun représentatifs de ce qu'était l'arbre maintenant adulte (de A années) à l'âge correspondant (n années). Par conséquent, on procédera aux relevés expérimentaux nécessaires pour caractériser successivement les individus de 1 à A à partir des mesures périphériques et dendrologiques. L'ensemble des données récoltées sur les arbres de 1 à A constituera la base de données nécessaire à la modélisation de l'état de contrainte dans un arbre adulte sur la base des simulations numériques établies par M. FOURNIER.

De plus, la maîtrise d'une bonne partie des facteurs de variabilité permet d'isoler un seul paramètre afin de le faire varier et d'en étudier les effets sur les déformations résiduelles périphériques de croissance. Par exemple on vérifiera sur un petit échantillon bien contrôlé l'effet de l'écartement sur un clone donné du même âge: le dispositif existe dans les plantations expérimentales du CTFT (essai dit de "MARYNEN").

V.2 - Estimation des déformations résiduelles longitudinales de croissance

Au cours de cette étude nous avons estimé, dans bois en périphérie de l'arbre, l'intensité des déformations potentielles résiduelles longitudinales notées α_{LL} (voir § II.3). Dans le bois récemment

créé on peut décrire α_{LL} comme étant le rapport de la contrainte sur le module d'élasticité longitudinal E_L du bois au point de mesure.

La grandeur α_{LL} est préférée à la contrainte longitudinale car :

- Elle est a priori directement mesurable (voir § II.3 et II.4).
- Elle a un sens rhéologique simple (voir § II.3 et II.4) et peut a priori être reliée directement à la structure anatomique du bois.
- Elle a également un sens "biologique" puisque la dissymétrie de la mesure sur la circonférence traduit la potentialité d'un arbre à se réorienter ou à se stabiliser.
- Elle est la grandeur utile lorsqu'on s'intéresse aux voilements et tuilages des pièces sciées résultant de la libération des contraintes internes de croissance: les propriétés élastiques du bois, qui permettent de remonter aux contraintes ne sont pas des paramètres sensibles de ce problème qui reste un problème de déformations observées plus que d'efforts appliqués.

Par contre, si l'on se préoccupe des ruptures induites par la modification du champ initial des contraintes lors de l'abattage et des différents modes de débit qui suivront, on doit raisonner en terme d'effort et décrire le champ des contraintes. Dans ce cas le problème devient beaucoup plus complexe puisqu'il requiert la connaissance:

- des propriétés élastiques du matériau (au moins les plus sensibles)
- des propriétés aux états limites (enveloppes de rupture, fissilité)
- du champ des contraintes initial dans l'arbre

Ces paramètres sont à déterminer en tous points de la structure et, de surcroît, il est nécessaire de connaître et de définir le processus de libération dans le temps (durée de l'opération et temps d'observation [PRIEST 1981]) et dans l'espace (géométrie des découpes [ARCHER 1986]). En effet, celui-ci conditionnera l'intensité et la disposition des fentes. Cependant, malgré l'ensemble des paramètres concernés et de leur variabilité, on pourra s'intéresser, dans un premier temps, aux fentes en bout à partir d'observations simples et de la relation qu'il existe entre les ruptures observées et α_{LL} (intensité et position).

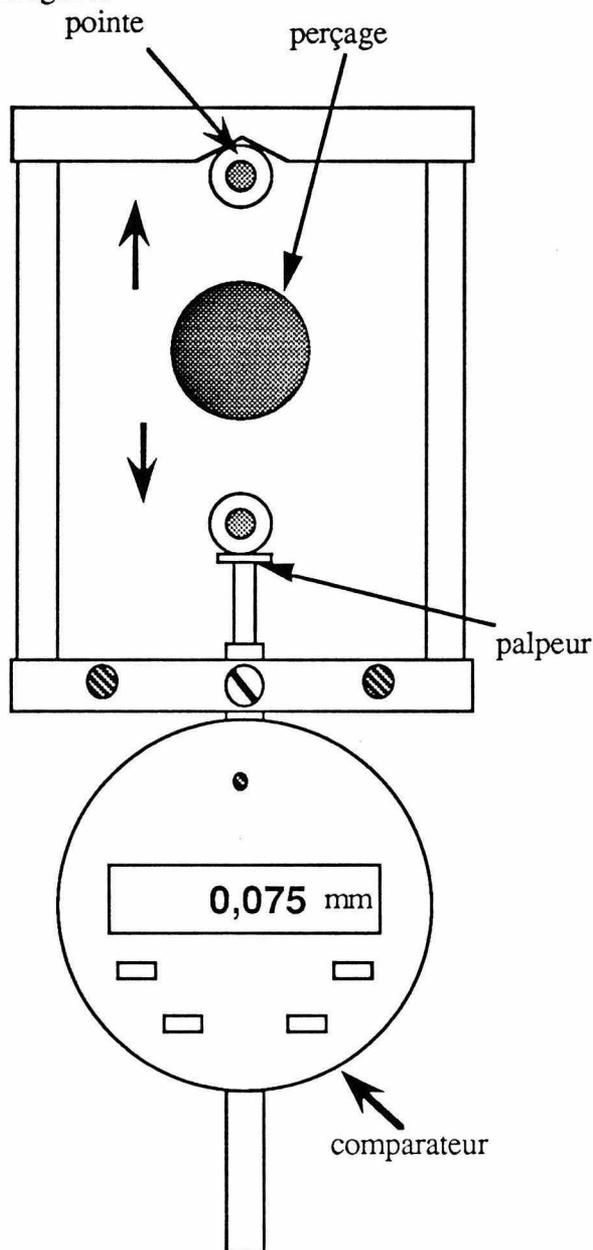
Deux méthodes d'estimation de α_{LL} sont utilisées pour cette étude qui utilise deux principes différents (voir § II.2):

- mesure de déplacements résultant de la perturbation du champ de contrainte par enlèvement de matière sur la structure, c'est la méthode dite du trou unique [ARCHER, 1986; MARIAUX 1982]
- mesure de déformations par isolement, dans une direction, du reste de la structure d'une portion de matière: celle-ci est supposée passer de l'état pré-contraint à un état naturel.

V.2.1 La méthode dite du trou unique

Expérimentalement nous avons mis en œuvre cette méthode en utilisant un capteur conçu par le C.T.F.T. (voir [Figure V.2.1](#)). Le principe métrologique est la mesure de la variation de distance D , due au perçage d'un trou central de 20mm de diamètre à l'aide d'un vilebrequin, entre deux pointes distantes de 45mm dont l'axe passant par leur centre suit le fil du bois (nous nous intéressons aux déformations longitudinales de maturation). Les pointes sont enfoncées sur une profondeur fixée à 12mm par la position de leur tête sur le bois après écorçage (dégagement du xylème secondaire sous le cambium). Le déplacement est donné par un comparateur (MITUTOYO) à lecture digitale avec une sensibilité au micron, la mesure est enregistrée dès que le comparateur indique une valeur stable alors que le forage se poursuit. Le principe mécanique de cet essai est basée sur la variation de D inversement proportionnelle à α_{LL} à géométrie du capteur fixée (distance entre pointe et diamètre de perçage). Une analyse mécanique rigoureuse montre de manière analytique que la variation mesurée dépend en outre de l'anisotropie élastique du bois dans le plan longitudinal-tangentiel (i.e. les rapports S_{22}/S_{33} , S_{23}/S_{33} , S_{44} , S_{33}) et des composantes du champ des contraintes autres que longitudinales (dans notre cas il s'agit de la composante tangentielle), mais que ces paramètres restent peu sensibles pour du bois dit "normal" [ARCHER 1986, FOURNIER 1989b]. Donc si on se donne les rapports d'anisotropie élastique dans le plan LT du bois vert (directement

mesurés ou extraits des données de la littérature) on peut donc estimer σ_{LL} . Toutefois, il convient de vérifier la sensibilité des différents paramètres mécaniques (que l'on aura déterminés sur le bois étudié) dans le cas du bois de tension puisqu'ils semblent différer notablement du bois "normal". De plus, la base de mesure étant relativement importante (45mm) il faut prendre garde de ne pas placer une singularité ou un défaut entre les pointes. Il est donc important de se placer, autant que possible, dans une zone de bois sain et homogène.



CAPTEUR CTFT

FIGURE V.2.1
(échelle ~1:1)

L'analyse mécanique montre que la variation de distance δ par la méthode du trou unique est interprétée comme :

$$\frac{\delta(B)}{2R} = Y_L S_{33} \sigma_{LL} + Y_T S_{33} \sigma_{TT} = Y_L S_{33} \sigma_{LL} \left(1 + \frac{Y_T \sigma_{TT}}{Y_L \sigma_{LL}} \right)$$

où Y_L , Y_T , sont des grandeurs (adimensionnelles) qui dépendent du rapport $\frac{a}{R}$ entre le diamètre du trou $2a$ et la base de mesure $2R$ (distance entre pointes avant essai), ainsi que des rapports d'anisotropie élastique du matériau : $\frac{S_{22}}{S_{33}}$ ($=E_L/E_T$), $\frac{S_{23}}{S_{33}}$ ($=-v_{LT}$), $\frac{S_{44}}{S_{33}}$ ($=E_L/G_{LT}$).

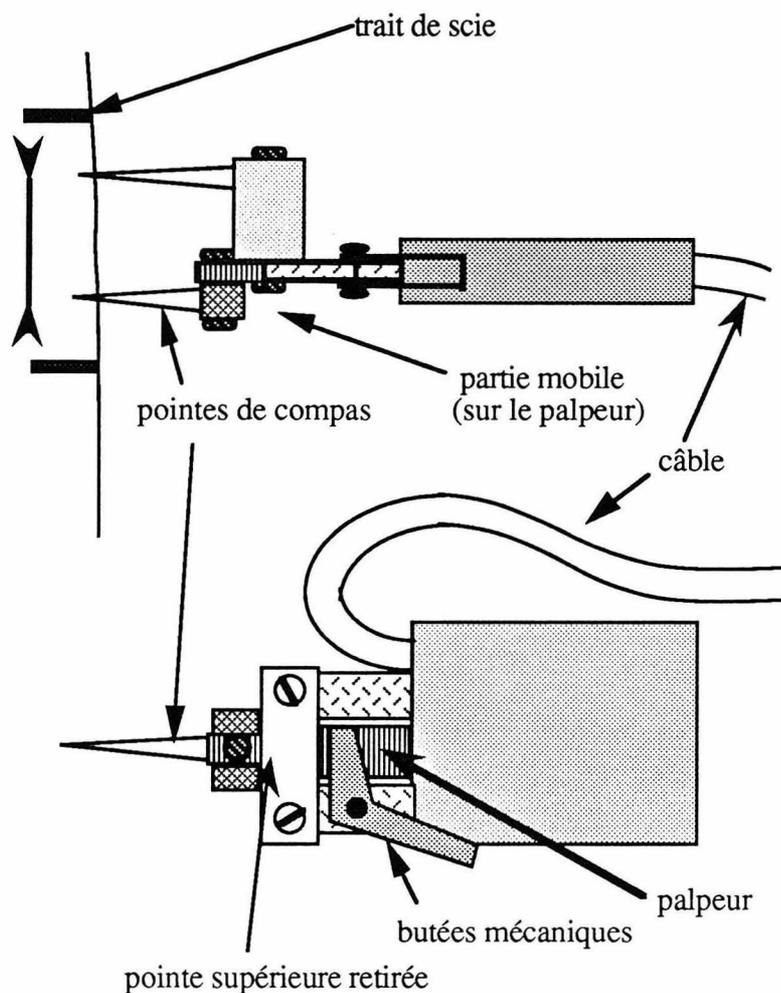
Or, pour $a/R \approx 0.5$, les constantes Y_L et Y_T sont opposées, du même ordre de grandeur : $Y_L \approx -Y_T \approx 2$. Là encore, le terme correctif reste inférieur à 10%.

On peut encore affirmer, en faisant une erreur de moins de 10%, que la mesure de δ donne une estimation de σ_{LL} , par une formule unidirectionnelle $\sigma_{LL} = \frac{\delta}{2R S_{33} Y_L}$.

La mesure d'une déformation, ou d'une variation de distance dans le direction longitudinale, permet une bonne estimation de la composante σ_{LL} .

V.2.2 - La méthode des deux rainures

Pour cette méthode on utilise un capteur de déplacement dont la course du palpeur est transformée en signal électrique: ce capteur est fabriqué par l'entreprise HBM (voir [Figure V.2.2.A](#)) et garantit un certain nombre de caractéristiques techniques intéressantes pour le type de mesures que nous effectuons dans des conditions de terrain (capteur industriel). La transformation du signal électrique est opérée à l'aide d'un pont de jauges d'extensométrie, montées en pont complet et collées sur le palpeur, à l'intérieur d'un boîtier. Dans notre cas le palpeur a été équipé de pointes de compas (elles offrent la meilleure tenue une fois plantée dans le bois) de manière à l'employer comme extensomètre à pointe que l'on enfonce sur une profondeur de 1 à 2mm. Avec ce montage la **base de mesure est de 13,5mm. La course du palpeur est de $\pm 2,5$ mm**, il est protégé par deux butées mécaniques qui empêchent la détérioration du capteur en cas de dépassement de course, une autre butée sert à bloquer le palpeur sur la base de mesure avant positionnement. La linéarité du capteur est meilleure que 0,05% par rapport à la fin d'échelle (donné par le constructeur). L'appareil est calibré avec son câble de manière à obtenir une sensibilité de 1mV/V d'alimentation lorsque le palpeur se déplace de 1mm. Cette sensibilité est identique pour toute course de ± 2 mm avec une incertitude $< 0,01\%$. Le câble de raccordement, souple, d'une longueur de 1,5m, possède une boîte de contenant des résistance de calibrage. Ce capteur est relié à une centrale d'acquisition de terrain (pont de mesure et compensateur) construite par une entreprise spécialisée (CAPTEL). Elle permet, en outre, de raccorder 3 capteurs de ce type à la fois et un peson extensométrique.



CAPTEUR HBM

FIGURE V.2.2.A
(échelle ~1:1)

Après écorçage afin de positionner le capteur sur le bois, la méthode consiste à mesurer la déformation longitudinale résultant du sciage manuel de deux rainures de part et d'autre des pointes du capteur. Il apparaît que deux rainures, perpendiculaires au fil du bois, assez proches des deux pointes du capteur suffisent à libérer la plus grande part de la déformation longitudinale [GUENEAU 1973, FOURNIER 1989b et essais de l'équipe ASMA sur chataignier]. A géométrie fixée (base de mesure du capteur, distance des entailles aux pointes et profondeur du sciage), plus le retrait α_{LL} est grand, plus la déformation mesurée par le capteur est grande. Comme précédemment, la grandeur mesurée dépend mais de façon peu sensible de l'anisotropie du bois. La prise de mesure s'effectue comme suit:

- usinage de la première rainure; dès que la valeur affichée par la centrale d'acquisition se stabilise alors que le sciage se poursuit on passe à l'autre rainure.
- on procède de la même manière pour la seconde rainure; en fin d'opération on note immédiatement la valeur stabilisée.

Les 2 rainures perpendiculaires à une ligne verticale D sur laquelle se trouve les pointes du capteur, distantes de 24mm, réalisent $\sigma_{LL}=0$ aux bords des rainures, et est supposé assurer $\sigma_{LL}=0$ en tous les points du segment D où la variation $\Delta\sigma_{LL}$ de la composante longitudinale est donc $-\sigma_{LL}$.

En admettant alors que la variation $\Delta\sigma_{TT}$ de la composante tangentielle reste faible, (de sorte que $|\Delta\sigma_{TT}| \ll -S_{33}|\sigma_{LL}|/S_{23}$), la mesure est l'estimation de

$$\varepsilon^*_{LL} = S_{23} \Delta\sigma_{TT} - S_{33} \sigma_{LL} \approx -S_{33} \sigma_{LL}$$

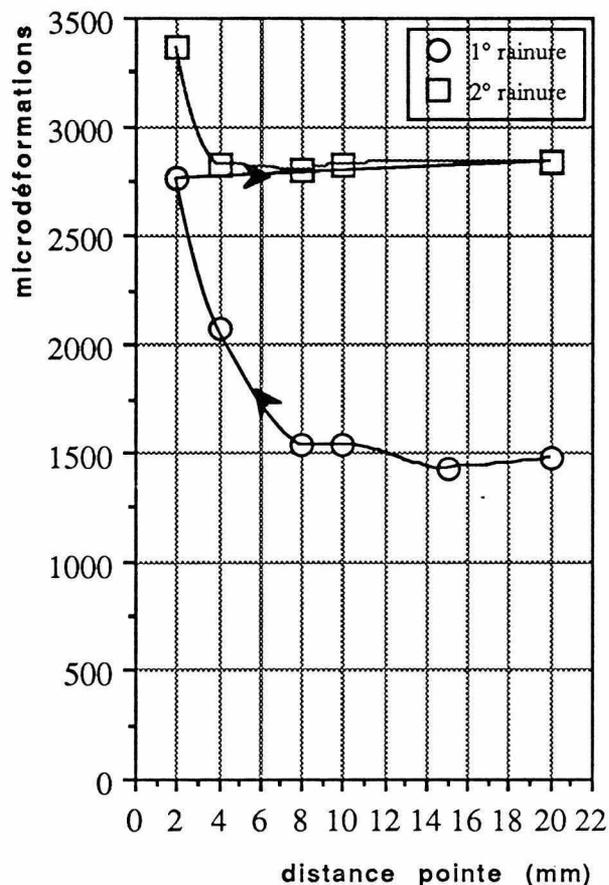
De ce fait, $\Delta\sigma_{TT}$ étant faible, la mesure ε^*_{LL} est très proche de α_{LL} et estime donc directement la déformation de maturation longitudinale. L'hypothèse que le sciage des deux rainures isole suffisamment le segment D du reste du tronc pour lui permettre d'atteindre sa longueur naturelle sera à vérifier par la suite à l'aide d'une analyse rigoureuse comme semble l'indiquer le paragraphe suivant.

Lors des essais préliminaires une difficulté d'ordre métrologique est apparue. En effet, comme le montre la Figure V.2.2.B, la distance de la rainure à la pointe du capteur influence notablement la valeur enregistrée: suivant cette distance il semble qu'on enregistre une plus ou moins grande part de la déformation totale potentielle. Les deux graphes représentent chacun deux modes différents de mesure: après avoir planté le capteur sur la tige, sur Eucalyptus on commence par des sciages se rapprochant progressivement d'une des deux pointes ensuite on poursuit avec l'autre pointe; sur le châtaignier on approche en alternant d'une pointe à l'autre. Sur ces deux essences, qui ont des plans ligneux très éloignés, la valeur enregistrée pour une distance donnée est plus forte sur Eucalyptus au point de mesure. D'autres essais de ce type prouvent que l'on commence à enregistrer une déformation à partir d'une distance d'environ 40mm des pointes. La lecture des deux graphes montrent deux phénomènes importants:

- un effet de bord semble survenir à une distance d'environ 4mm
- la distance de sciage influence grandement la lecture

L'analyse mécanique de ces phénomènes sera effectuée par la suite avec une méthode d'analyse numérique (par exemple en éléments finis). Pour cette étude nous avons choisi arbitrairement une distance systématique de **5mm** compte tenu de l'aspect pratique sur le terrain (il ne faut pas que la pointe soit perturbée par l'effet du sciage) et parce que cette distance est un compromis entre l'obtention de valeurs suffisamment significatives et une relative faible sensibilité à la distance (hors de la zone attribuée à l'effet de bord).

Essai sur Eucalyptus: distance de sciage à la pointe de chaque côté du capteur fonction de la déformation stabilisée enregistrée.



Essai sur chataignier: distance de sciage à la pointe de chaque côté du capteur fonction de la déformation stabilisée enregistrée.

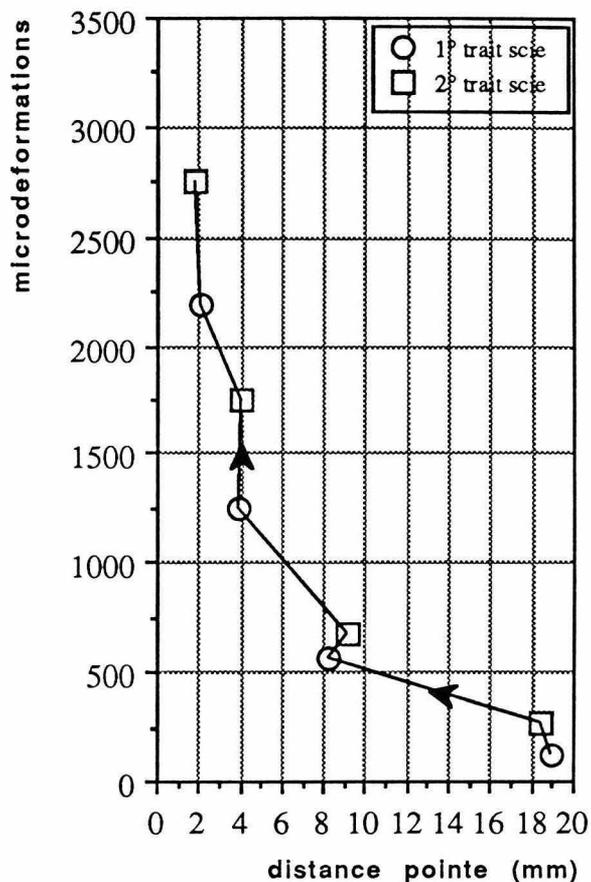


FIGURE V.2.2.B

Lors de la mission au Congo nous avons étalonné 3 capteurs HBM à l'aide d'une vis micrométrique montée sur un bâti comportant deux cubes de bois: l'un fixé à la vis, l'autre solidaire du bâti, de manière à être le plus proche possible de la mesure de terrain (conditions de fixation des pointes). Le capteur est planté à cheval sur les deux blocs de bois et on enregistre la valeur donnée par la vis (de $10\mu\epsilon$ en $10\mu\epsilon$ aller et retour) fonction de la valeur lue sur la centrale d'acquisition (une fois les réglages de gain effectués pour chaque capteur). L'étendue de la calibration correspond à l'échelle des valeurs de déformations longitudinales moyennes communément rencontrées en forêt: jusqu'à $\approx 4000\mu\epsilon$ (voir [Figure V.2.2.C](#)).

ETALONNAGE DES CAPTEURS HBM

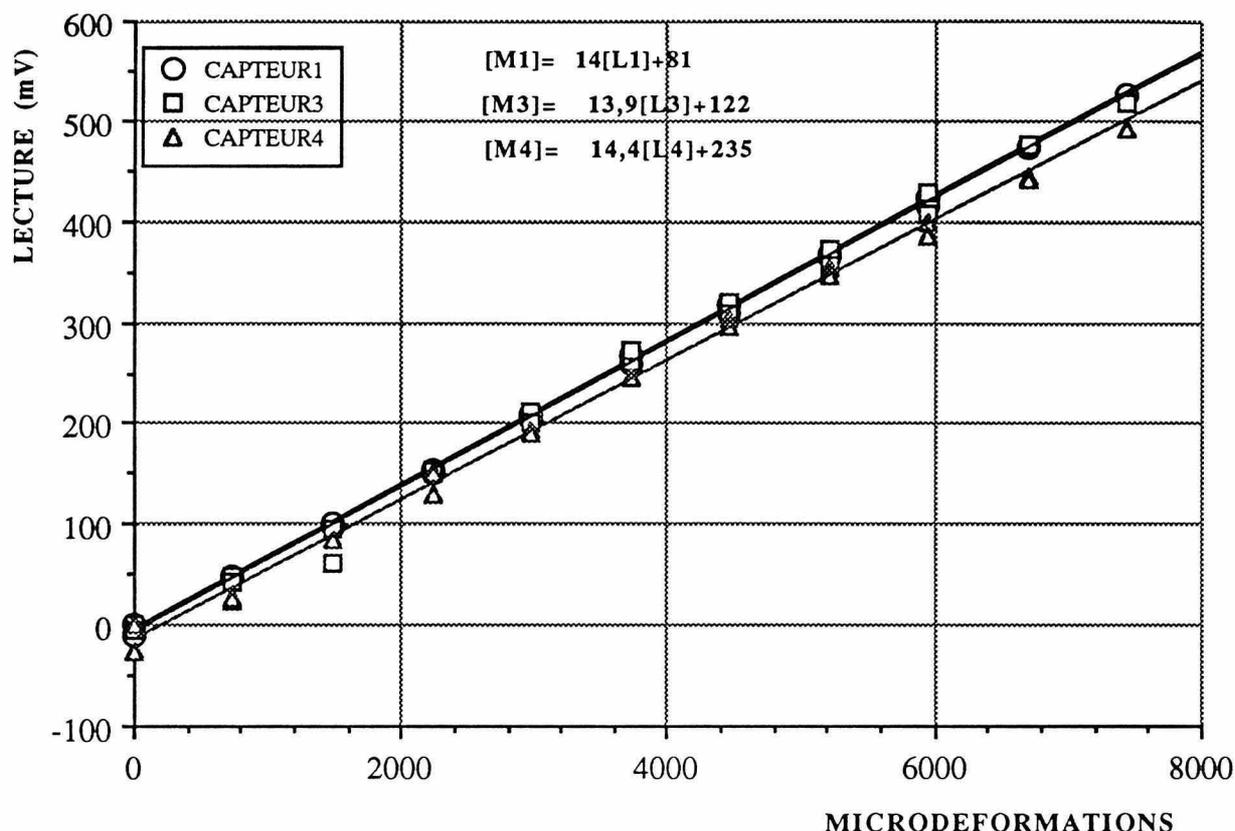


FIGURE V.2.2.C

Par une régression simple on obtient la valeur de la conversion entre la valeur lue et la déformation mesurée. On retiendra: **1 unité de lecture = 14 $\mu\epsilon$** à $\pm 2\%$ pour les capteurs 1 et 3 qui ont été les seuls utilisés durant la mission. La constante qui apparaît dans les équations de calibration est due aux rattrapage des jeux de la vis micrométrique lors du retour.

V.2.3 - Comparaison des deux méthodes

On remarque pour la deuxième méthode une meilleure stabilité des enregistrements avec une réponse plus instantanée du matériau à la découpe que pour la méthode du trou unique. En effet dans ce dernier cas il semble que le procédé de coupe tranche moins nettement les fibres ce qui induit des contraintes "parasites", provenant également de la mèche hélicoïdale en bout de foret qui provoque une légère compression.

Le principe de cette méthode implique une perturbation permanente de la mesure due aux conséquences du vent dans le houppier. Avec la méthode des deux rainures le vent n'est gênant que pour la mise à zéro (un tout petit peu de patience suffit en attendant l'accalmie).

La méthode du trou unique est plus traumatisante pour les arbres puisque, d'une part elle oblige à dégager une plus grande surface de bois (base de mesure plus importante), et d'autre part le forage enlève une plus grande quantité de matière.

La méthode des deux rainures est plus local, à la fois sur la surface avec une plus faible base de mesure et sur la profondeur avec un enfoncement des pointes également plus faible.

Sur l'Eucalyptus un très grand nombre de mesures ont été doublées, d'abord parcequ'il était nécessaire d'avoir une méthode de secours en cas de mauvais fonctionnement de l'une ou l'autre ensuite cela nous permettait d'améliorer nos connaissances métrologiques (les deux méthodes ont été employées sur une même génératrice par rapport au fil du bois). Avant de doubler les mesures,

plusieurs essais ont montrés que le perçage sur "la même fibre" que le capteur HBM ne le perturbe plus au-delà d'une distance de 10cm qui sera respecter au cours de la campagne de mesures.

La figure V.2.3 montre le graphe obtenu à partir des mesures doublées. Une corrélation correcte est obtenue (significative au risque de 1 pour mille), mais la variabilité résiduelle est forte. Ce dernier point est facilement explicable puisque les mesures ne sont pas effectuées exactement au même endroit sur l'arbre. Des séries mesures sur une "même fibre" de bois montrent qu'à quelques centimètres de distance les valeurs observées par une même méthode peuvent différer jusqu'à 40%, la présence de défauts peu visibles et très locaux (poche de kino sous-jacente, plage de bois de tension localisée ou oblique ...), favorisent ces écarts (voir mesures sur répétitions). Une analyse statistique des variations locales (dans des zones proches de quelques centimètres) rencontrées à l'aide d'une seule méthode permettrait probablement d'expliquer la variabilité résiduelle observée.

En outre, deux remarques importantes sont à formuler:

- La régression ne passe pas par l'origine du graphe.

- La relation ne semble pas linéaire, deux zones se distinguent: quelques points hauts qui seraient liés à la présence de bois de tension et beaucoup de points bas liés à la présence de bois normal.

Ces remarques nous incite à émettre l'hypothèse d'une anisotropie élastique du bois normal et du bois de tension suffisamment différente pour provoquer une discontinuité ou plutôt une non linéarité de la relation entre les deux types de mesure. De fait on pourrait imaginer aisément que deux régressions linéaires ou une polynomiale permettraient d'ajuster ces deux groupes de points.

COMPARAISON DES DEUX METHODES

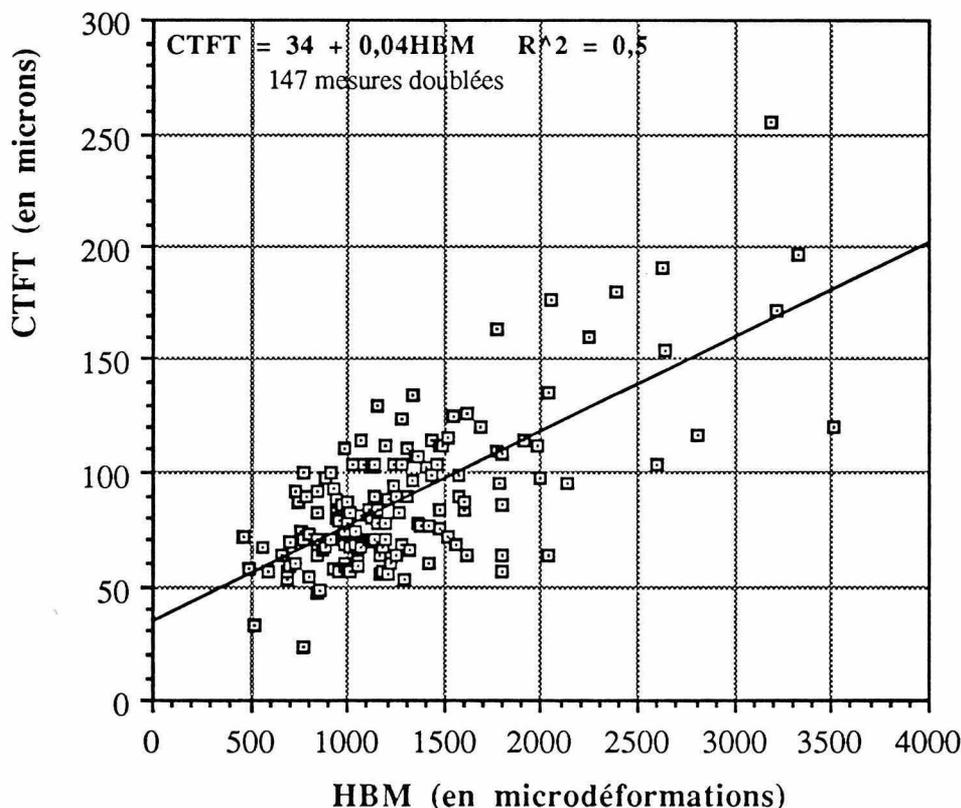


FIGURE V.2.3

En conclusion, il faut garder à l'esprit que l'évaluation des contraintes de croissance est un problème métrologique, aucune méthode n'a encore été normalisée et chaque chercheur, selon ses moyens, utilise des techniques différentes avec des modes de dépouillement qui lui sont propres. Dans ces conditions, il faudra toujours être très prudent lorsque l'on comparera des valeurs obtenues par des moyens techniques et de dépouillement différents.

VI - CHOIX DES ARBRES ET DU TYPE DE MESURE

Dans le cadre de cette étude 31 arbres ont été sélectionnés selon des critères qui sont résumés dans le tableau VI:

Signification des différentes colonnes du tableau:

CODE	CLONE	AGE	D / H	ECART	NB COURONNES	COMMENTAIRES
arbre		mois			HBM / CTFT	
89-1	1 - 45	21	9 / 13	4,7x4,2	1 / 1	Arbre abattu complet - biomasse
89-2	1 - 45	21	9 / 13	4,7x4,2	1 / 0	essai éhouppage + masse
89-3	1 - 45	21	6 / 11	4,7x4,2	1 / 1	dominé - essai éhouppage
88-1	1 - 45	31	11 / 17	5x3	3 / 2	
88-2	1 - 45	31	10 / 16	5x3	1 / 2	
88-3	1 - 45	31	9 / 15	5x3	2 / 2	biomasse
85-1	1 - 45	65	14 / 23	4,7x4,2	1 / 1	Arbre abattu complet - biomasse - réit.
84-1	1 - 45	82	14 / 24	5x3	2 / 2	
84-2	1 - 45	82	16 / 24	5x3	4 / 4	1 couronne arbre abattu - mesure sur écorce
84-3	1 - 45	82	14 / 24	5x3	2 / 2	1 couronne arbre abattu - 1 rejet
82-1	1 - 45	105	16 / 27	5x3	1 / 1	biomasse
82-2	1 - 45	105	15 / 27	5x3	2 / 2	
82-3	1 - 45	105	13 / 23	5x3	1 / 2	
81-1	1 - 45	118	25/28	6x6	1 / 1	MARYNEN - pas d'échantillon
81-2	1 - 45	118	19/25	4,8x4,8	1 / 1	MARYNEN - pas d'échantillon
81-3	1 - 45	118	11 / 16	2,5x2,5	1 / 1	MARYNEN - pas d'échantillon
81-4	1 - 45	118	8 / 15	2,5x2,5	1 / 1	MARYNEN - pas d'échantillon - dominé
79-1	1 - 45	142	22/30	5x5	3 / 4	essai sciage
79-2	1 - 45	142	21/30	5x5	2 / 2	biomasse
79-3	1 - 45	142	21/30	5x5	1 / 2	1 rejet
32-1	2 - 32	105	20/29	5x3	3 / 3	Arbre abattu: 2 génératrices - biomasse
32-2	2 - 32	105	22/29	5x3	1 / 1	
32-3	2 - 32	105	18/29	5x3	1 / 0	
II-3-1	2 - 3	105	18 / 28	5x3	1 / 2	
II-3-2	2 - 3	105	18/23	5x3	1 / 1	Essai influence capteurs HBM/CTFT
II-3-3	2 - 3	105	19/29	5x3	4 / 2	Arbre abattu complet
18-14-1	18 - 14	92	17/28	4,7x4,5	1 / 1	
18-14-2	18 - 14	92	17 / 28	4,7x4,5	0 / 1	
131-1	L2-131	105	17 / 26	5x3	1 / 1	
131-2	L2-131	105	15/22	5x3	0 / 1	
Réitération sur arbre de lisière: clone 1 - 45; 14 mesures						

- **CODE**: chaque arbre est repéré et les billons prélevés (qui contiennent une ou deux couronnes de mesure) portent le numéro de l'arbre plus un chiffre suivant sa position, de même pour chaque point de mesure de déformation.

- **CLONE**: au total 5 clones ont fait l'objet de mesure, le premier chiffre correspond à l'hybride (1=PF1; 2=12ABL et 18 est un autre hybride: Eucalyptus urophylla x grandis), le deuxième chiffre correspond à l'ordre de sélection du clone. La lettre L sur le dernier clone signifie que celui-ci a été sélectionné sur la station de Luvuiti.

- **AGE**: il est exprimé en mois.

- **H / D**: hauteur totale en m / diamètre à 1,4m en cm.

- **ECART.**: écartement, le premier chiffre est l'écartement entre lignes, le deuxième est l'écartement sur la ligne entre les arbres.

- **NB COURONNES:** donne le nombre de couronnes de mesure pour chacun des deux capteurs effectué sur la tige (lorsqu'il y a une seule hauteur la couronne est placée à 1,4m)
- **COMMENTAIRES:**
 - > arbre abattu = mesures de déformations périphériques sur arbre débité au sol.
 - > biomasse = pesée des feuilles, brindilles, branches et tronc.
 - > essai éhouppage = mesure de la déformation due à la suppression de la tige au-dessus du capteur.

Au total **811** mesures de déformations résiduelles périphériques ont été enregistrées avec l'une ou l'autre des deux méthodes, dont 444 sur arbres sur pied. Pour chaque arbre étudié une fiche de résultat est établie (voir ANNEXE I). Chaque arbre a été dessiné et mesuré par C. LOUP dans l'espoir de relier certains paramètres architecturaux ou morphologiques aux Déformations Résiduelles Longitudinales Périphériques (DRLP).

Les critères qui ont présidés aux choix des arbres ont été les suivants:

- avoir une série de parcelles d'un même clone dans laquelle le plus grand nombre de classes d'âge soit représentées sur une station donnée.
- avoir plusieurs clones issus d'hybrides différents à des âges comparables.
- les clones choisis sont vigoureux, adaptés au milieu et bien conformés (pas de courbures, de fourchaisons ou de gommoses excessives).

La morphologie des Eucalyptus des plantations clonales est très régulière et il est difficile pour le profane de distinguer les différents hybrides. Ils sont droits (inclinaison inférieure à 6%), effilés avec des houppiers peu fournis et bien équilibrés qui s'inter-pénètrent très rarement même pour les plus âgés. La compétition, si elle existe réellement dans le cas de clone identique, devrait être active plutôt au niveau du système racinaire. Tous les plants sont fertilisés à la plantation d'une manière équivalente.

Les arbres sélectionnés, 3 par clone et par âge, ont été choisis individuellement loin des bordures de chaque parcelle. Chaque couronne comprend entre 4 et 8 mesures repérés par un chiffre, par commodité tous les points de mesure sont repérés par rapport au point 1 qui est l'origine relative, les points suivant évoluent de 45° en 45° par rapport à l'origine (2=45°, 3=90°...). Le point 1 est située sur la face la face opposée à la direction de déséquilibre global de l'arbre. C'est aussi la direction où l'arbre semble devoir se redresser ou se stabiliser et donc où l'enregistrement de déformations résiduelles élevées et la présence de bois de tension sont probables. L'expérience montre que l'estimation est très souvent correcte dans un secteur de $\pm 45^\circ$ (d'autant mieux que l'arbre est déséquilibré, la difficulté du repérage survenant lorsque l'arbre est très droit). On constate sur le terrain que, par manque d'expérience, les mesures à l'aide des capteurs sont souvent plus fiables pour abattre correctement que l'impression à l'œil. Dans la suite de l'exposé nous allons mettre en évidence les différentes tendances observées sur des paramètres bien contrôlés sans chercher à les quantifier statistiquement vu la faible importance de l'échantillonnage.

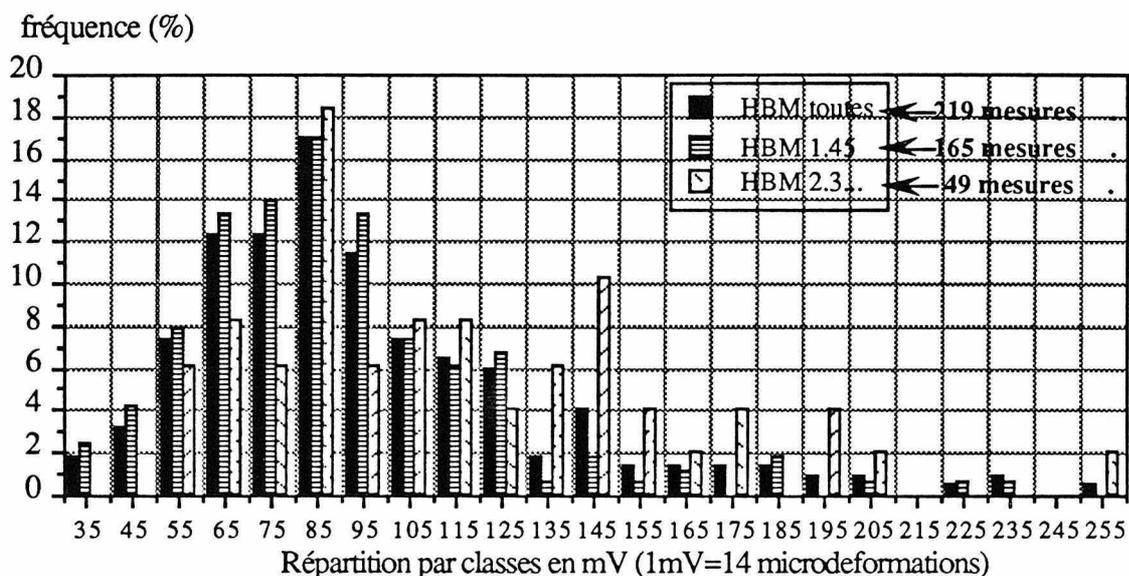
VII - ANALYSE DES RESULTATS ARBRE SUR PIED

VII.1 - Analyse globale des valeurs obtenues

La figure VII.1 représente les histogrammes de répartition par fréquence de toutes les mesures enregistrées arbre sur pied, pour chacune des deux méthodes (le premier graphe concerne la méthode des deux rainures et le deuxième en-dessous la méthode du trou unique) et pour les deux hybrides les plus utilisés (PF1 il s'agit du clone 1.45 et 12ABL comprenant trois clones: 2.3, 2.32, L2.131). Il est important de signaler ici que les valeurs données pour l'un ou l'autre des capteurs ne sont pas directement comparables, en effet c'est par hasard que l'étendue des valeurs et la sensibilité des deux méthodes sont identiques.

Si l'on se préoccupe de l'allure générale des histogrammes on remarque que la distribution est composée de deux parties (distribution bimodale): l'une située dans les valeurs basses (disons pour les deux types de capteur en-dessous de 130), l'autre située dans les valeurs hautes au-dessus de 130 et jusqu'aux environs de 260 dans les deux cas. La première partie de l'enveloppe des deux histogrammes se rapproche d'une distribution normale de Gauss (pour le capteur CTFT elle ressemblerait à une distribution χ^2), quand à l'autre partie les valeurs se répartissent sur une plage assez importante avec une légère diminution vers les plus fortes valeurs (c'est la "traîne" de la répartition).

METHODE DES DEUX RAINURES



METHODE DU TROU UNIQUE

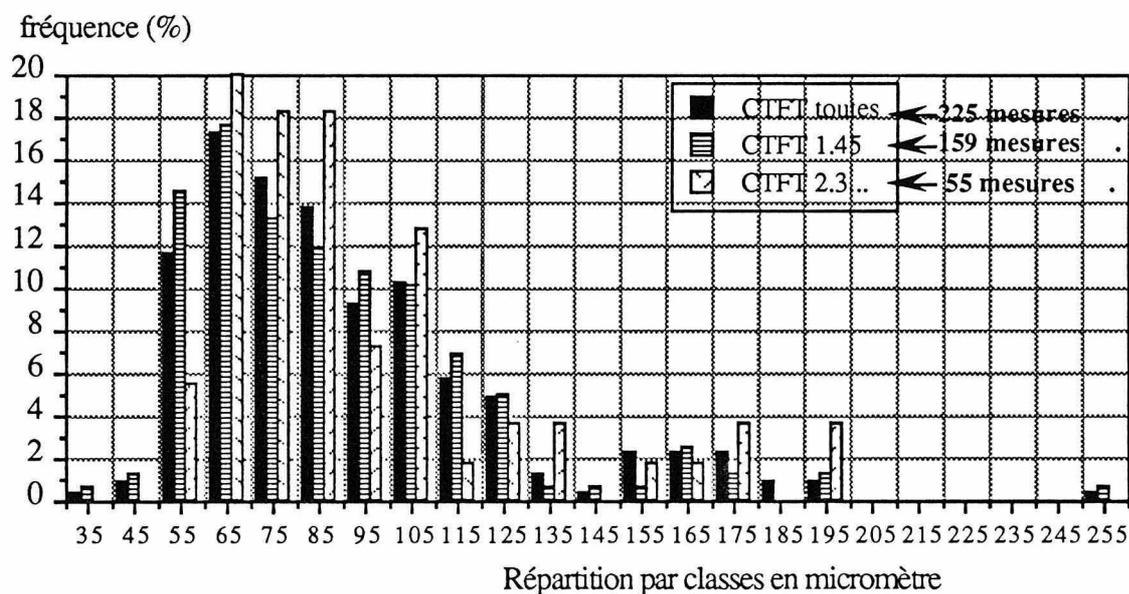


FIGURE VII.1

Ce type de répartition a été constaté sur plusieurs autres essences (équipes ASMA) dans des conditions de croissance totalement différentes (hêtre, wapa, châtaignier, peuplier, pin maritime: pour cette essence la répartition est inversée à cause des propriétés particulières du bois de compression). De plus les valeurs moyennes rencontrées dans les premières parties des graphes de fréquence de ces essences sont tout à fait comparables, seul différent les "traînes": longueur et importance en effectif. De plus il n'y a aucune corrélation entre la valeur maximale enregistrée sur la couronne de mesure et les valeurs moyennes situées hors du pic ou la valeur minimale enregistrée. Ceci s'accorderait avec le fait que la source de ces phénomènes provient de la composition biochimique et de la structure interne des parois cellulaires qui dans le bois normal, en moyenne, est tout à fait équivalente lorsque l'on s'intéresse aux cas des feuillus. Par contre les différences sont notables si l'on observe les bois de tension dont la composition biochimique et la structure pariétale présentent de fortes variabilités. Là encore, la présence ou non de tel ou tel type de bois de réaction doit influencer fortement l'allure des graphes obtenus. Il serait donc intéressant d'analyser anatomiquement les parois cellulaires des échantillons de bois sur lesquels ont été effectués les mesures. On pourra alors essayer dans un

premier temps de déterminer une valeur moyenne de DRLP pour le bois normal en triant les échantillons et en détectant les sources de variation possibles, locales ou non (proximité d'une singularité). Ensuite pour le bois de tension il s'agira de définir des critères d'intensité ou plutôt chercher à relier une valeur forte mesurée et la présence de bois de tension (fréquence des cellules de réaction, proximité par rapport à l'axe de la mesure, épaisseur des couches gélatineuses...) afin d'essayer de corrélérer au mieux la valeur de la mesure à ces différents paramètres. Enfin, ce travail nous permettrait à partir de cartographies macroscopiques du bois de tension de conduire des simulations numériques établies par M. FOURNIER afin de réaliser une topographie probable des contraintes due à la maturation cellulaire dans l'arbre. Par la suite, on pourra s'intéresser aux phénomènes de libération lors des opérations de débits.

Si en première approximation on pose une limite supérieure arbitraire de présence dominante de bois normal équivalente à 130 pour les deux capteurs (en mV pour le capteur HBM, en μ mètre pour le capteur CTFT), statistiquement on obtient pour le:

--> capteur HBM: moyenne= 83 mV ($1\text{mV}=14\mu\epsilon$); écart type= 22,4; erreur standard= 1,6 pour 186 observations

--> capteur CTFT: moyenne= $82\mu\text{mètre}$; écart type= 20,3; erreur standard= 1,4 pour 201 observations

Comparé au graphe du capteur HBM, l'allure de la distribution des mesures récoltées à l'aide du capteur CTFT semble plus "ramassée", on peut probablement attribuer cet effet à la conception même de ce capteur qui intègre une plus grande zone de bois, il a donc tendance à "moyenner" la valeur enregistrée.

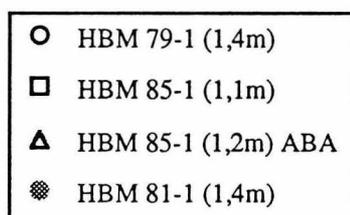
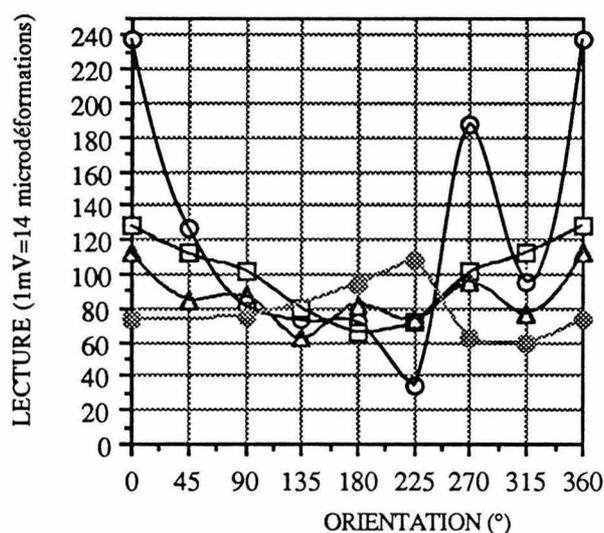
Si maintenant on compare la distribution des valeurs pour chacun des deux hybrides on constate que l'hybride 12ABL (3 clones) a une "traîne" plus importante en effectif. Cette remarque sera à approfondir lorsque l'on s'intéressera aux fentes d'abattage.

VII.2 - Analyse des déformations résiduelles sur la couronne

VII.2.1 - Dissymétrie angulaire

Sur la Figure VII.2.1 sont représentées plusieurs couronnes de mesure caractéristiques pour les deux capteurs, la position 0° correspond à la face estimée tendue. On constate une dissymétrie angulaire importante sur pratiquement tous les arbres sauf sur le 32-1 qui lorsque l'on observe sa morphologie est un arbre très droit ayant un houppier parfaitement équilibré et de petites réitérations placées haut sur la tige. Comme nous l'avons déjà signalé l'estimation "à l'œil" de la face tendue, compte tenue de l'inclinaison générale de la tige et de la dissymétrie éventuel du houppier, coïncide généralement avec la position du pic. Cependant, les erreurs d'appréciations sont parfois importantes comme dans le cas du 82-2 où apparait un pic très pincé qui, comme nous le verrons plus loin est peut-être lié à la présence de réitérations basses ou de singularités au-dessus de la mesure. On n'est donc jamais certain d'avoir détecté le sommet du pic et il est par conséquent difficile de considérer la valeur maximale enregistrée sur la couronne comme une mesure objective de la déformation maximale sur cette couronne. On met en évidence dans ce cas la nécessité d'effectuer plus de 4 mesures lorsque le maximum (resp. minimum) présumé n'a pas été détecté. En effet un simple déphasage de quelques degrés peut modifier notablement cette valeur. du fait de l'accuité des pics. Dans ce cas l'erreur commise peut avoir des conséquences importantes. C'est la raison pour laquelle dans beaucoup de cas nous avons effectué plus de 4 mesures.

COURONNES DE MESURES - CAPTEUR HBM



COURONNES DE MESURES - CAPTEUR CTFT

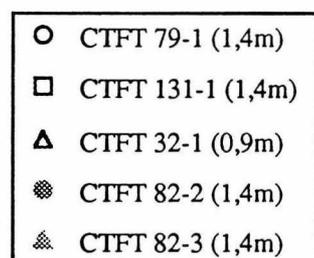
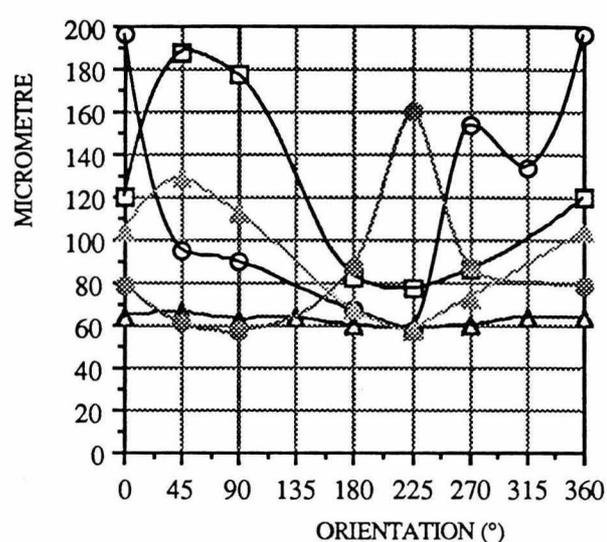


FIGURE VII.2.1

La courbe traçant la valeur mesurée fonction de la position angulaire sur la couronne, présente donc des allures variables: hauteur, largeur et intensité du pic, on peut même rencontrer deux pics sur la même courbe (arbre 79-1)! Dans les représentations théoriques la dissymétrie angulaire est souvent schématisée par une fonction sinusoïdale, à la vue de ces résultats expérimentaux (et sur d'autres essences par l'équipe ASMA) il semblerait qu'un autre type de modèle défini sur les base d'une étude statistique soit nécessaire. On trouvera à l'ANNEXE II d'autres types de courbes à des hauteurs variables sur une même tige.

On se préoccupe maintenant des déformations résiduelles hors des pics (on localise le pic dans un secteur angulaire d'environ 120°) c'est à dire celles présumées enregistrées sur du bois normal en l'absence d'étude anatomique approfondie. La moyenne de leurs valeurs ou même le minimum sur la couronne ne sont pas corrélés significativement avec la valeur maximale enregistrée. Ces zones semblent donc indépendante. Pourtant, si l'on observe attentivement l'ensemble des couronnes étudiées, on s'aperçoit que 3% de l'ensemble des valeurs (11 au total) représentant les plus faibles et appartenant à la classe [30;40] (les deux méthodes confondues puisque les répartitions des valeurs sont comparables) sont situées sur les mêmes couronnes que les 9 % de l'ensemble des valeurs (40) représentant les plus fortes et appartenant à la classe [150 et au-dessus], sauf pour 3 couronnes dont les maximaux sont situés entre 130 et 150, mesurés avec le capteur HBM et comprenant 4 mesures sur la couronne. Dans ce cas, il se peut que le sommet du pic soit placé entre nos mesure, ce qui est fort probable au vue des courbes de la figure VII.2.1 et des couronnes proches qui révèlent des valeurs plus fortes; ceci rejoint la remarque formulée plus haut. A la suite de cette observation on peut s'interroger sur la présence ou non de bois opposé, qui reste une notion assez abstraite dans la littérature scientifique, peut-être tenons-nous un moyen de le qualifier ? Cela reste à confirmer par des analyses anatomiques rigoureuses.

VII.2.2 - Influence de l'inclinaison de l'arbre

Les mesures d'inclinaison ont été effectuées à 1,4m à l'aide d'un fil à plomb de 70cm de long et d'une règle graduée. Les corrélations établies entre:

- l'azimuth de la déformation maximale enregistrée fonction de l'azimuth de l'inclinaison locale de la tige.
 - le maximum enregistré sur la couronne fonction de l'inclinaison locale de la tige.
- sont peu significatives.

Ces résultats peuvent paraître surprenant puisque sur le hêtre, par exemple, pour les mêmes relations M. FOURNIER et B. CHANSON trouvent de bonnes corrélations. Dans notre cas le problème provient du fait que l'inclinaison locale évaluée sur 70cm à 1,4m ne reflète pas du tout l'équilibre général de l'arbre malgré un houppier toujours bien centré sur son axe (les Eucalyptus sont très élancés). De plus les inclinaisons enregistrées sont faibles donc leur impact sur les déformations périphériques sont probablement limitées. Enfin, il faut rester prudent puisque ce type de corrélation revient à relier une grandeur quasi-statique, l'inclinaison à un stade donné, à une grandeur dynamique la DRLP qui évolue beaucoup plus rapidement que l'inclinaison.

Toutefois, la Figure VII.2.2 montre que sur l'ensemble de la population échantillonnée la tendance à la réorientation vers une position verticale est nette.

INCLINAISONS MAXIMALES EN EXTRADOS EN %
DE PENTE A 1,4m FONCTION DE LEURS ORIENTATIONS

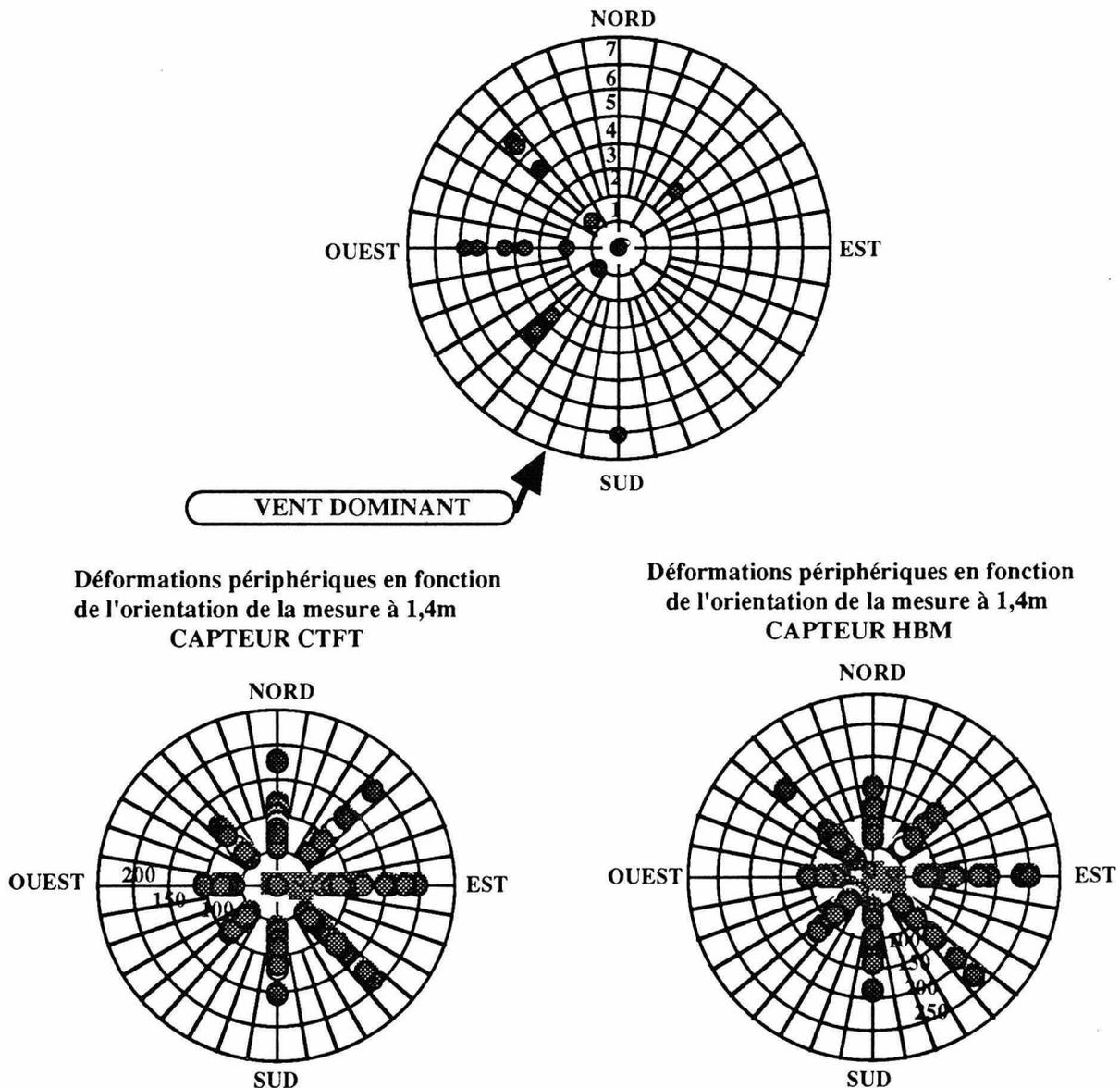


FIGURE VII.2.2

L'orientation générale des inclinaisons montre une tendance notable à se développer vers le secteur Ouest, mais le vent dominant n'explique pas cette tendance, ni d'ailleurs aucune hypothèse satisfaisante. On peut invoquer les effets de la luminosité et de la mer (albédo plus forte côté mer) mais le débat reste ouvert...

VII.3 - Evaluation des contraintes et déformations de support

L'étude théorique et les simulations qui en découlent ont été entièrement réalisés par M. FOURNIER et D. GUITARD [1989b, 1990a, 1991], les conclusions de leurs travaux sont reprises ici: "L'état mécanique d'une tige à un instant actuel donné dépend non seulement des conditions actuelles de géométrie et de chargement, mais surtout de toute l'histoire de l'évolution de ce chargement. En particulier, les champs de contraintes longitudinales σ_{LL} exercées par le support du poids propre dans l'arbre déséquilibré ne sont pas une tension ou une compression maximale à la surface, dans l'axe du déséquilibre actuel, car les points proches du cambium, créés récemment, ne sont a priori que très peu sollicités. Ces champs de contraintes σ_{LL} ont alors été simulés dans une section droite, dans diverses situations schématiques de croissance et d'évolution conjointe du chargement, qui confirment quantitativement ce résultat. Les zones les plus sollicitées sont en effet toujours à proximité de la moelle, là où le bois est âgé. Les valeurs maximales de tension ou compression peuvent être sensiblement plus élevées que celles prédites par la distribution statique σ_{LL} . Elles ne sont pas nécessairement dans l'axe du déséquilibre final. Prendre en compte les seules grandeurs globales observables dans l'état final ne permet donc pas de décrire l'état mécanique interne d'une tige dû au support du poids propre".

L'analyse mécanique des contraintes de support associées aux contraintes de maturation réclame donc la reconstitution de l'histoire de la géométrie et des sollicitations de l'arbre. Il faut donc s'attacher à dégager, dans la situation actuelle, les paramètres morphologiques et anatomiques pertinents, indicatifs des situations antérieures. Actuellement nous sommes en mesure de fournir partiellement ces paramètres expérimentaux (morphologie, biomasse et déformations résiduelles périphériques au cours du temps) sur le clone PF1, il manque encore l'analyse des échantillons qui permettrait de relier l'anatomie à des propriétés mécaniques particulières (maturation et constantes élastiques notamment pour le bois de réaction). Donner des valeurs de contraintes de support précises sur une section droite n'aurait pas une réelle utilité dans l'état actuel de nos connaissances (cela a déjà été effectué en simulation numérique par les auteurs cités plus haut), cette partie est réservée à la seconde phase des recherches où l'on se préoccupera de l'état mécanique sur toute la section droite et les conséquences qu'il implique lors de l'abattage.

Cependant en utilisant la résistance des matériaux classique (établie pour des poutres isotropes transverses mais qui donne une excellente approximation des déformations longitudinales dans le cas d'un matériau considéré, en première approximation, comme orthotrope cylindrique) on peut, en considérant l'arbre comme une structure statique initialement droite, donner une approximation des déformations périphériques. De telles hypothèses reflètent plus l'effet instantané d'une sollicitation de très courte durée comparé à la durée de vie de l'arbre, par exemple un abattage ou les conséquences du vent dans le houppier.

A titre indicatif, en utilisant les formules données dans l'article de M. FOURNIER, P. LANGBOUR et D. GUITARD [1990a] et les données enregistrées lors des mesures dendrologiques et de biomasse sur l'arbre **II-3-3** nous obtenons en se plaçant à la périphérie dans le plan d'inclinaison à 1,1m:

- > $\epsilon_{LL} = +130$ microdéformations avec:
Arbre incliné et houppier centré; $E_L = 11000$ MPa à l'état vert (donné du CTFT sur ce clone); angle d'inclinaison = 4° qui est le maximum rencontré lors de la mission.
- > $\epsilon_{LL} = +1190$ microdéformations avec:
Arbre incliné et houppier centré; $E_L = 11000$ MPa à l'état vert (donné du CTFT sur ce clone); angle d'inclinaison = 45°
- > $\epsilon_{LL} = +1670$ microdéformations avec:
Arbre incliné et houppier centré; $E_L = 11000$ MPa à l'état vert (donné du CTFT sur ce clone); angle d'inclinaison = 90°
- > $\epsilon_{LL} = +13$ microdéformations avec:
Arbre incliné et houppier centré; $E_L = 11000$ MPa à l'état vert (donné du CTFT sur ce clone); angle d'inclinaison = 0°

Lors de l'abattage la déformation gravitationnelle maximale longitudinale en périphérie de la tige sur la face opposée à la direction de chute vient s'ajouter aux DRLP qui sont du même ordre de grandeur. Un déséquilibre soudain de quelques degrés n'aura aucune influence notable sur l'état mécanique de la tige. Cependant il faut noter qu'au niveau de la charnière d'abattage, les contraintes peuvent dépasser les limites de rupture en traction, en compression et en cisaillement qui se répercutent sur la partie proche de l'entaille en initiant des ruptures ou en aggravant les fentes d'abattage dues aux contraintes de croissance.

VII.4 - Observations de l'effet de l'écartement sur les DRLP

Afin d'évaluer l'effet de l'écartement sur les déformations résiduelles longitudinales de maturation nous avons exploité un dispositif apparenté au plan d'expérience dit de "MARYNEN". Nous appellerons ce dispositif: l'essai MARYNEN. Pour le forestier il a pour objet l'étude de l'effet écartement sur une variable quantitative qui peut être, suivant les cas, le volume à l'hectare, l'accroissement de surface terrière, la circonférence moyenne Le dispositif croise au hasard 5 écartements formant une progression géométrique (de raison 0,8): 2,5 ; 3,1 ; 3,85 ; 4,8 ; 6 . Chaque plateau est séparé d'une ligne neutre. Le clone testé est le 1.45 lors de la prise de mesure il est âgé de 9 ans et 10 mois. L'essai montre que la fourchette de densité optimale pour la production se situe entre 580 et 770 tiges/ha et qu'au delà de 68 mois on observe une baisse très importante de la production quelle que soit la densité utilisée.

Afin de vérifier l'effet de l'espacement notre choix a porté sur 3 écartements: les deux extrêmes 2,5x2,5 et 6x6, et l'écartement intermédiaire 4,8x4,8 (on aurait dû raisonner en densité!). Pour les deux capteurs 4 mesures par couronne à 1,4m pour chaque arbre ont été enregistrées, au total donc 8 mesures par arbre. Un arbre par densité devait suffire à vérifier si l'écartement avait un effet remarquable sur ce clone (un arbre dominé a été choisi en plus pour la plus faible densité) dans le cas où les différences auraient été significatives nous aurions poursuivi l'échantillonnage dans l'espoir de tracer une courbe déformations=f(densité) et d'utiliser le dépouillement mis au point par J.C. BERGONZINI (CTFT) [1984].

La figureVII.4 représente les valeurs obtenues dans un graphe (densité, lecture enregistrée).

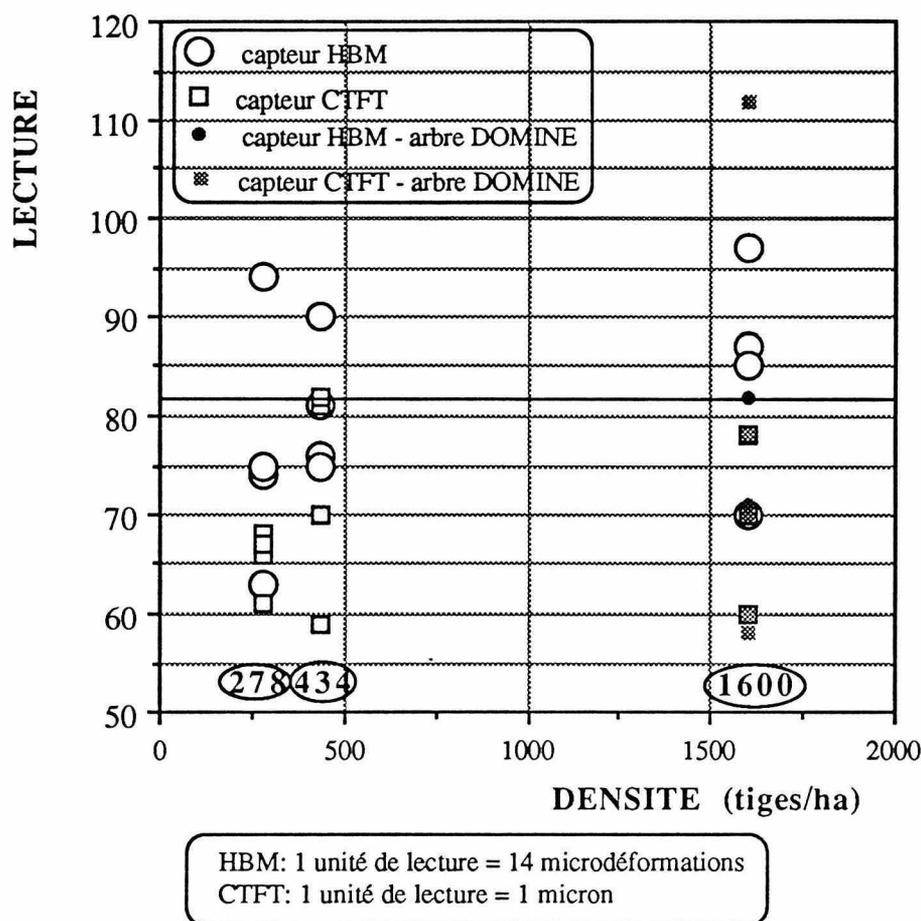


FIGURE VII.2

A la lecture du graphe, on remarque immédiatement le faible niveau général des mesures (une seule valeur dépasse 100). Les moyennes par arbre sont légèrement inférieures aux moyennes de l'ensemble des données récoltées durant la mission pour ce clone. La seule valeur relativement élevée provient d'un arbre dominé et chétif (mais vivant!) du plus petit écartement.

Même si peu d'arbres ont fait l'objet de mesures la lecture du graphe nous permet de constater l'absence d'influence de la densité de plantation sur les DRLP. Pourtant J.C. FERRAND [1981] montre, sur deux espèces plantées dans des parcelles d'essais: *Eucalyptus delegatensis* et *Eucalyptus nitens* en Australie, que le niveau moyen des contraintes dans une placette augmente fortement avec la compétition entre les arbres de même âge (il a montré une tendance similaire pour le hêtre). Dans ces conditions les Eucalyptus sont très sensibles à la concurrence (espèces pionnières). On peut alors se demander si au sein d'un clone il y a véritablement compétition, puisque dans le plus faible écartement, où les arbres se sont à peine développés, aucun d'entre eux n'est mort et ne semble pas réellement se différencier de son voisin (hauteur, diamètre), alors que leur croissance semble extrêmement ralentie depuis de nombreuses années. Dans le cas d'espèce on montre qu'une hiérarchisation sociale s'instaure dès que les arbres entrent en compétition avec comme conséquences l'apparition de strates ou d'une mortalité plus ou moins importante. Les arbres dominants ont alors à lutter pour obtenir et conserver leur position sociale, ce qui implique une importante capacité à occuper rapidement le maximum de volume qui leur est favorable. Ce "combat" entraîne des réorientations d'autant plus importantes et fréquentes que la pression de la concurrence est forte. On peut se demander si dans le cas des clones cette hiérarchisation, en grande partie sous contrôle génétique (surtout si le milieu est homogène), n'est pas considérablement amoindrie du fait de l'inexistence de différences génétiques. On expliquerait alors le faible niveau de contrainte quelque soit l'écartement malgré des ports d'arbre totalement différents. Cette hypothèse serait dans le cadre de notre étude une des spécificités de la culture clonale qui ouvrirait des horizons intéressants.

VII.5 - Evolution avec l'âge

Un des objectifs de cette mission était de rechercher si avec l'âge une évolution des déformations de maturation dans le bois normal existait. En effet, les modèles théoriques d'évaluation des contraintes de croissance les plus récents utilisent un principe de superposition de transformations mécaniques successives d'une bille qui croît en diamètre et d'accumulation de contraintes induites [ARCHER 1986; FOURNIER 1989]. Tous les paramètres sont donc susceptibles d'évoluer dans le temps, en particulier le tenseur des déformations induites de maturation $\underline{\alpha}$. Des lois d'évolution de $\underline{\alpha}$ sont proposées à partir des observations de la liaison entre la déformation longitudinale induite et l'angle des microfibrilles [BORDONNE 1987; BAMBER 1987], fondées sur la variation de cet angle le long d'un rayon. C'est dans le bois juvénile que la variation est la plus sensible. Sur certains feuillus on observe généralement une légère décroissance de cet angle dans la paroi S_2 durant les premières années de l'arbre correspondant à un état juvénile. Cependant ce paramètre n'est pas toujours le seul le facteur essentiel des variations de α_{LL} , notamment chez les feuillus. L'influence d'autres paramètres, longueur des fibres, épaisseur des parois, composition chimique... n'est pas encore totalement déterminé et fait l'objet de recherches par d'autres équipes. Certains auteurs montrent qu'une augmentation de la teneur en cellulose et de la densité (épaississement des parois) peut conduire à des valeurs de α_{LL} plus de 3 fois supérieures aux valeurs usuelles [ARCHER 1986, TRENARD 1975].

Le matériel clonal présent sur le terrain nous a permis de trouver pour un clone toute une série de classes d'âge, dans les mêmes conditions de croissance et dont la sylviculture est exactement la même. A partir des relevées de déformations périphériques résiduelles de maturation à 1,4m nous avons pu tracer les graphes de la Figure VII.5.

Dans le cas du clone 1-45, en ne considérant que les valeurs basses (<130) que l'on peut considérées comme provenant du bois normal, aucune évolution au cours du temps n'est remarquable (en trait plus épais est représenté la valeur moyenne de la population considérée et définie au § VII.1). Si l'on se focalise sur les valeurs élevées (>130) en observant les graphes concernant le clone 1-45 on note:

- à 21 mois quelques valeurs assez élevées qui peuvent s'expliquer par la présence du houppier juste au-dessus des couronnes de mesures; nous y reviendrons au § VIII.
- à 142 mois il s'agit d'une parcelle dite "à poteaux", c'est une parcelle conservée pour fournir des poteaux de lignes (c'est la raison pour laquelle elle n'a pas été coupée auparavant) que l'on vient exploiter sur le mode de la cueillette. L'éclaircie ainsi occasionnée provoque sûrement un déséquilibre du peuplement qui se traduit par la formation de bois de tension en proportion plus élevée que dans les peuplements non éclaircis (à confirmer par des analyses anatomiques).

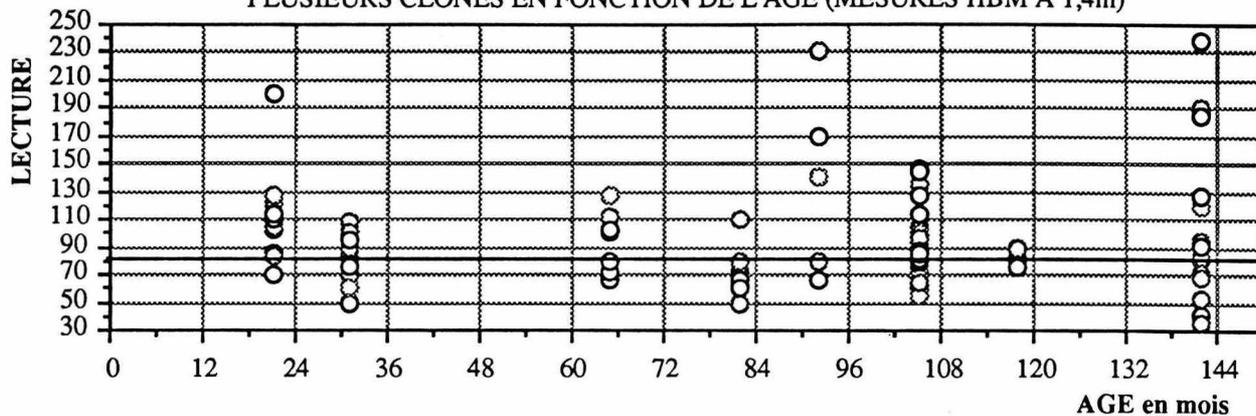
On remarque sur les graphes tous clones confondus:

- à 92 mois il s'agit d'un hybride différent (urophylla x grandis) dont la tige est assez flexueuse sur la parcelle des mesures (peut être à cause de la savanne toute proche).
- à 105 mois il s'agit d'hybrides 12ABL entourés de clones différents, dans ce cas il y a peut être compétition entre clone induisant proportionnellement plus de bois de réaction.

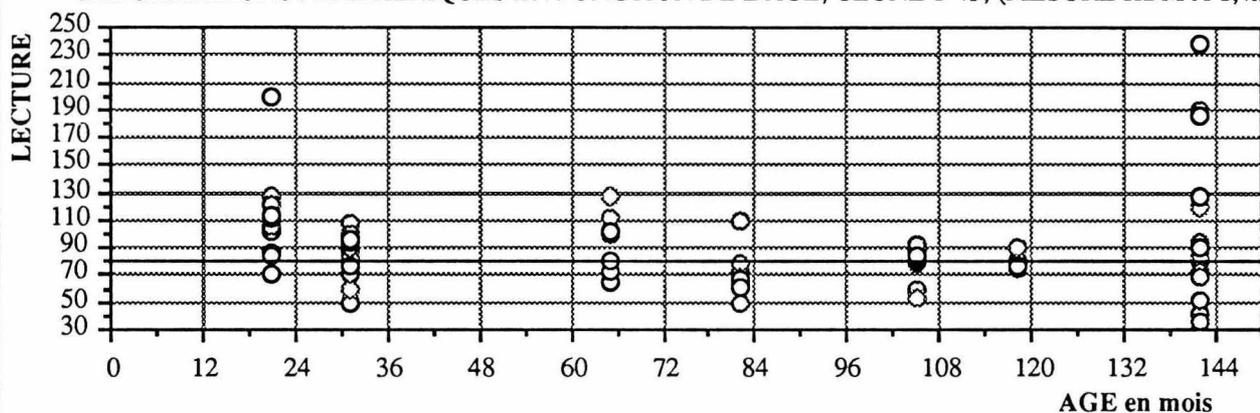
Le résultat obtenu pour le clone 1-45 peut paraître étonnant, particulièrement si dans la même période de croissance on observe la variation d'autres paramètres comme la longueur de fibres, le diamètre des vaisseaux et leur fréquence. En effet, P. DETIENNE [1989] dans une tentative de délimitation du bois juvénile sur ces clones, trouve une très forte variation de ces paramètres pour un diamètre de tige compris entre 1 et 25cm (intervalle qui correspond à notre échantillonnage). Par exemple, sur l'hybride PF1, il trouve que la longueur de fibre dans la fourchette donnée passe progressivement de 800 μm à 1200 μm avec un léger tassement de la courbe pour les plus gros diamètres. MALAN [1989] sur des descendants de "plein frère" d'Eucalyptus trouve une corrélation négative entre la longueur de fibre et les contraintes de croissance, mais il est vrai qu'ils ont utilisés l'extension des fentes en bout comme indicateur indirect. Ces paramètres ne seraient donc pas corrélés à nos mesures pour le cas particulier des deux hybrides étudiés.

FIGURE VII.5

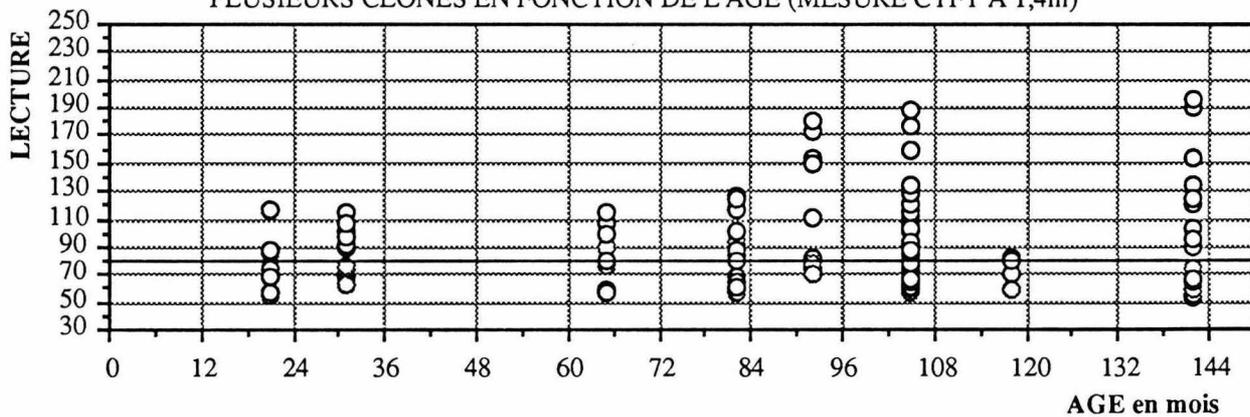
DEFORMATIONS PERIPHERIQUES MESUREES SUR
PLUSIEURS CLONES EN FONCTION DE L'AGE (MESURES HBM A 1,4m)



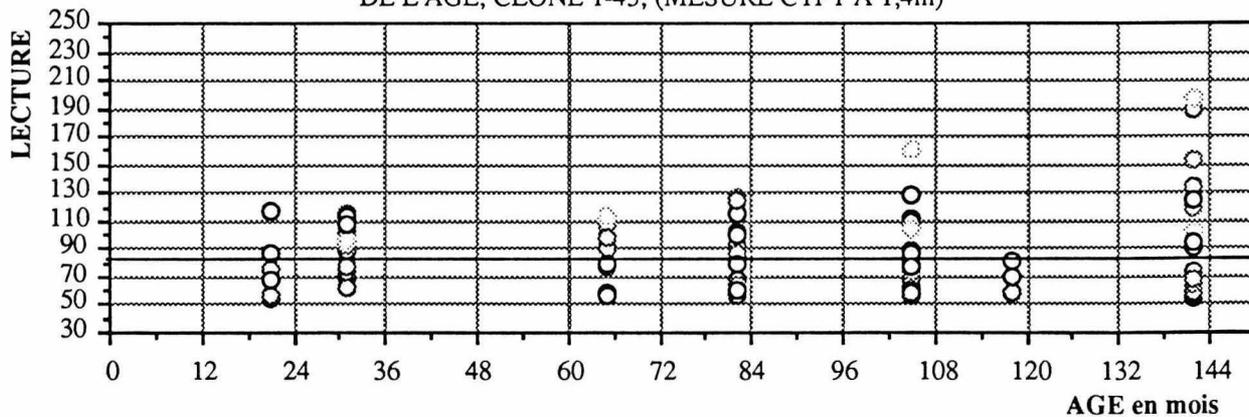
DEFORMATIONS PERIPHERIQUES EN FONCTION DE L'AGE; CLONE 1-45; (MESURE HBM A 1,4m)



DEFORMATIONS PERIPHERIQUES MESUREES SUR
PLUSIEURS CLONES EN FONCTION DE L'AGE (MESURE CTFT A 1,4m)



DEFORMATIONS PERIPHERIQUES EN FONCTION
DE L'AGE; CLONE 1-45; (MESURE CTFT A 1,4m)



La seule source de variation apparente serait donc la présence ou non de bois de tension qui lui semble être créé par l'influence de conditions exogènes. Il faudra dans l'avenir s'intéresser à l'angle des microfibrilles (et peut être au taux de cellulose) afin de vérifier si ce paramètre déterminant explique en partie les différences rencontrées sur les valeurs obtenues. Ceci passe par une étude rigoureuse du bois de tension.

A ce stade de l'étude, dans le cas où l'on s'intéresse à la qualité du bois, on peut légitimement se demander si le paramètre clef ne serait pas la proportion de bois de tension dans la tige, en dehors de toute autre considération.

VIII - ANALYSE DES RESULTATS ARBRE ABATTU

En règle générale, lorsque l'on veut étudier une propriété particulière dans l'arbre sur pied, pour des raisons pratiques, on choisit arbitrairement d'effectuer les mesures à 1,3m. Il serait pratique, en effet, de pouvoir qualifier certains paramètres du bois par une petite quantité de prélèvements à cette hauteur. Pour cela, il faut avant tout analyser les variations des propriétés étudiées à l'intérieur de l'arbre. Nous venons d'étudier la variation des déformations résiduelles avec la position angulaire sur la circonférence et avec l'âge, une étude anatomique devrait nous permettre d'étendre nos connaissances à la variation sur le rayon à partir de l'analyse de rondelles. Il nous restait à étudier la variation longitudinale paramétrée par la ramification. Les mesures que nous avons réalisées arbre sur pied demandent beaucoup de temps et de matériels pour peu de mesures et beaucoup d'effort. Les résultats obtenus ont été décevants par manque d'informations (voir ANNEXE II), aussi avons nous décidé de réaliser un plus grand nombre de mesures mais cette fois sur un arbre abattu.

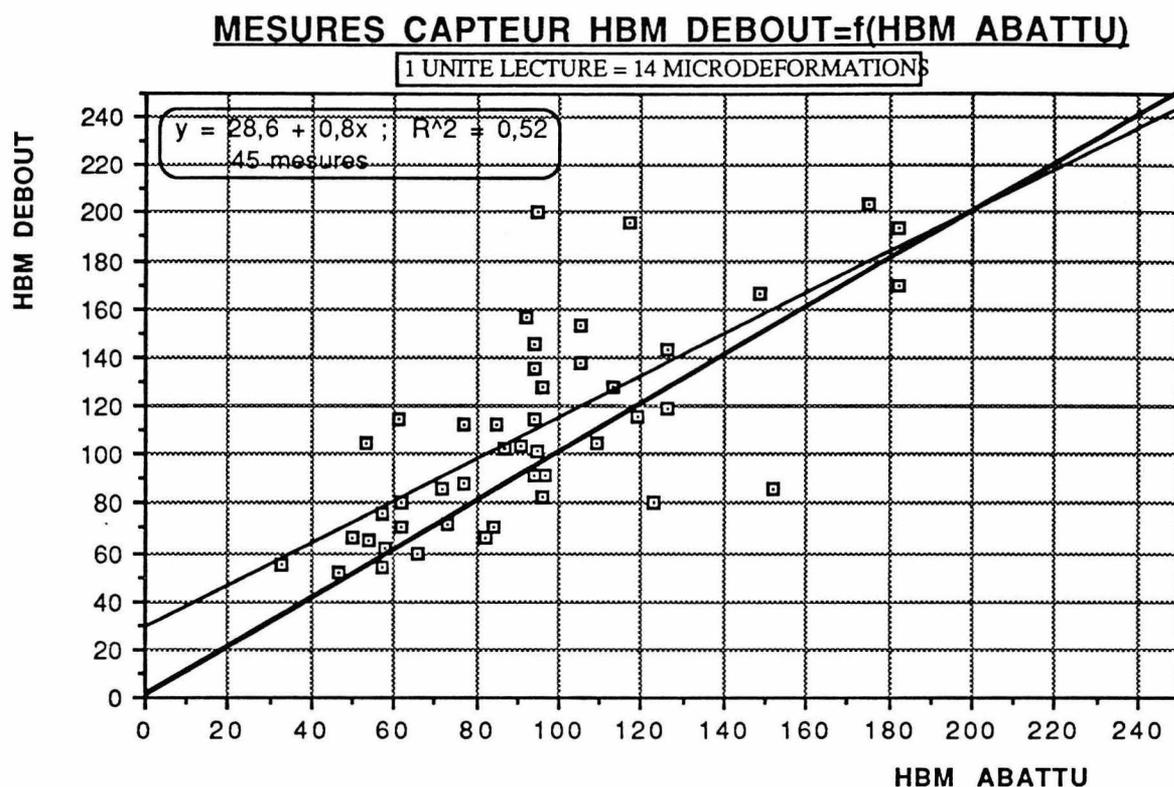
Les mesures de déformations résiduelles (à l'aide des deux capteurs) se sont réparties suivant 4 génératrices (à 90°) le long de la tige afin de conserver une position angulaire fixe aux différentes hauteurs. Puis les arbres ont été tronçonnés en billons de 1m qui représente, dans le cas des arbres étudiés, un optimum qui permet:

- de réaliser les mesures assez loin des extrémités du billon (à plus de 2 diamètres) pour éviter que les contraintes longitudinales en périphérie n'aient déjà été libérées par le tronçonnage [ARCHER 1986; WILLHELMY 1973]. Des essais sur le terrain nous ont permis de confirmer cette donnée.

- d'éviter des déformations parasites dues à la flexion d'un billon trop long qui reposerait en porte-à-faux sur le sol.

- de pouvoir manipuler des billons d'un poids pas trop excessif!.

Afin de vérifier l'effet de l'abattage et du tronçonnage sur les valeurs enregistrées nous avons établi la relation entre mesure arbre debout et abattu, représentée à la Figure VIII.



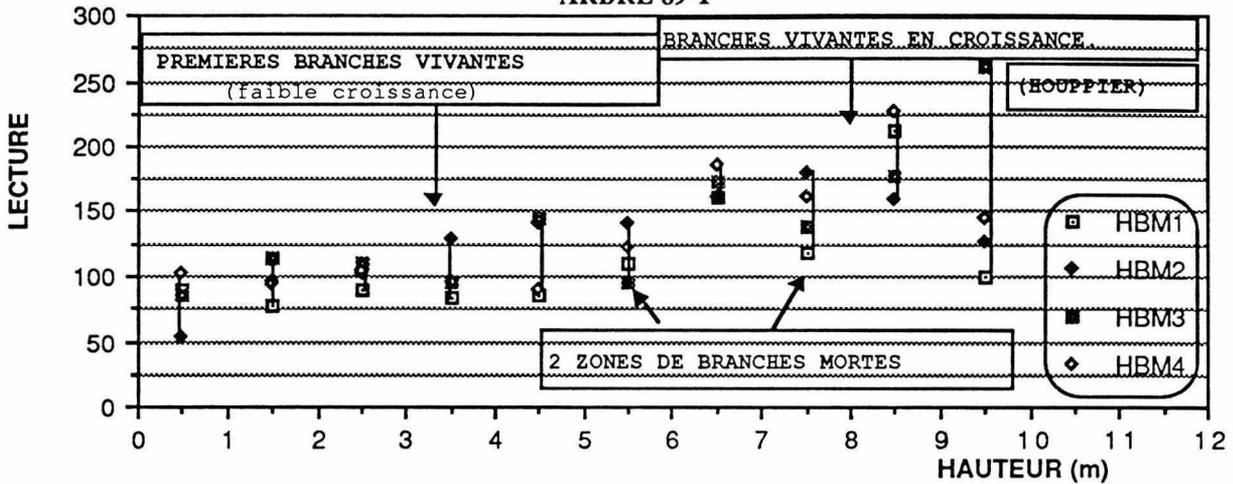
La corrélation obtenue est excellente, les mesures abattues étant d'environ 10 à 20% inférieures aux mesures debout (en gras est représentée la droite $x=y$). Cet écart pourrait être dû:

- à l'apparition de fentes, uniquement à cœur, lors de l'abattage et du billonnage qui libéreraient une partie des contraintes à l'endroit de la mesure (puisqu'elles s'étendent en profondeur) et particulièrement les plus fortes. Il suffit pour s'en persuader de constater que ce sont les valeurs les plus élevées de l'arbre sur pied qui s'écartent le plus de la régression sauf pour deux valeurs basses dont la cause peut être la raison citée ci-dessous.

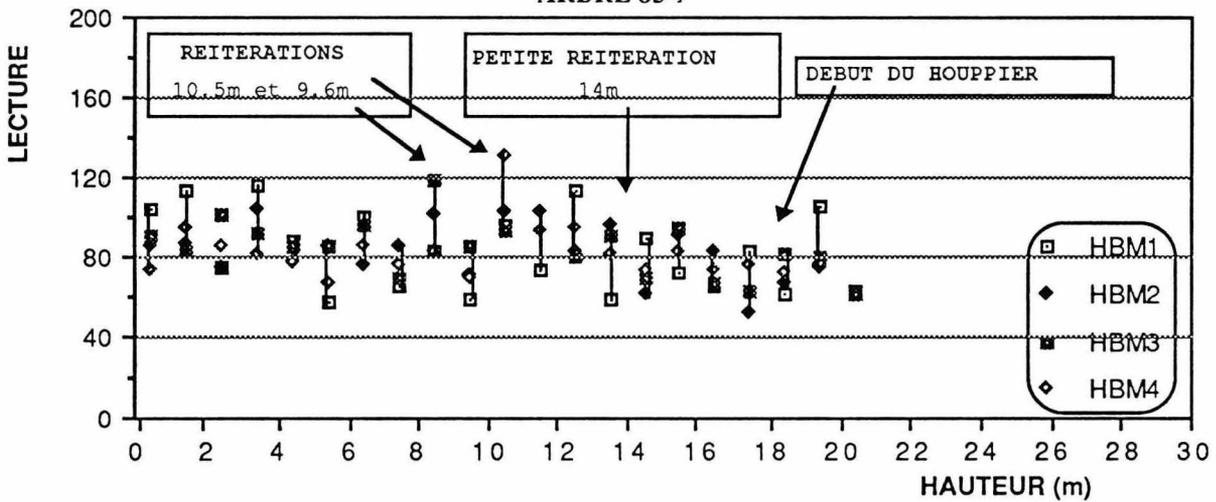
- au fait que les deux couronnes à comparer debout/abattu sont proches (≈ 10 cm) mais non identiques. Deux points de mesure proches peuvent se trouver sur des zones de bois différents.

L'effet du poids du houppier et de la tige supprimés peut également expliquer en partie (quelques dizaines de microdéformations, voir § VII.3) ce phénomène: il induit une très faible sur-tension moyenne doublée d'un moment fléchissant [FOURNIER 1990].

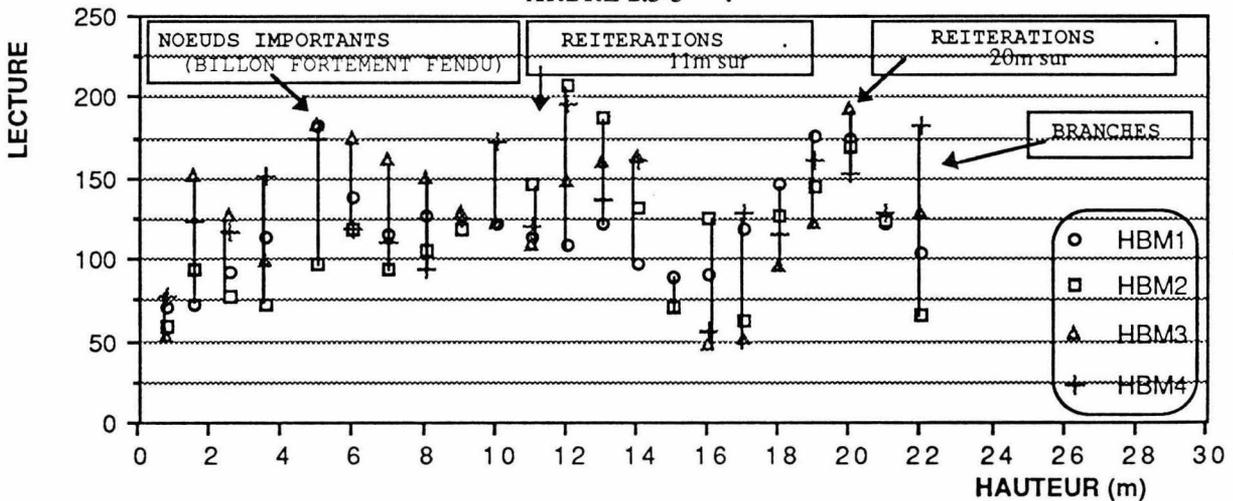
DEFORMATIONS PERIPHERIQUES MESUREES SUR UN ARBRE ABATTU (MESURES HBM)
ARBRE 89-1



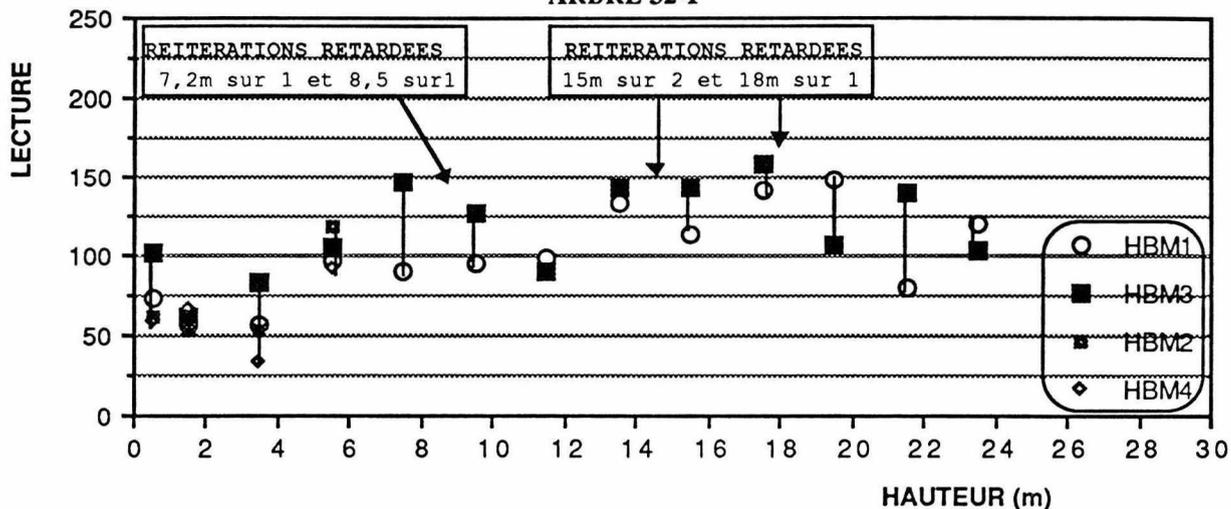
DEFORMATIONS PERIPHERIQUES MESUREES SUR UN ARBRE ABATTU (MESURES HBM)
ARBRE 85-1



DEFORMATIONS PERIPHERIQUES MESUREES SUR UN ARBRE ABATTU (MESURES HBM)
ARBRE 2.3-3



DEFORMATIONS PERIPHERIQUES MESUREES SUR UN ARBRE ABATTU (MESURES HBM)
ARBRE 32-1



On constate immédiatement, sur la tige, qu'à l'approche d'une réitération (branche croissant dans la direction verticale et paraissant reformer un houppier à elle seule), d'une branche ou d'un nœud les déformations résiduelles augmentent rapidement. Les déformations paraissent plus élevées du côté opposé à l'insertion de ces axes sur la tige. Non seulement la valeur maximale augmente mais il semblerait que toutes les valeurs de la couronne augmentent également en même temps qu'augmentent, dans une certaine mesure, les écarts entre les valeurs extrêmes. Si l'on porte attention à l'arbre 89-1, que l'on a mesuré jusqu'en haut du houppier, dès que l'on a atteint les premières branches du houppier les valeurs maximales augmentent avec la hauteur et la dissymétrie sur la couronne s'accroît. De plus comme semblerait le montrer les arbres 32-1 et 2-3-3 les fortes valeurs sont localisées du côté opposé à l'axe secondaire considéré, ce qui dans une certaine mesure permettrait de lutter contre le déséquilibre occasionné par celui-ci. Ces observations amènent deux questions:

- quelle est l'influence de la ramification sur l'induction de fortes contraintes de part et d'autre de ces axes dans un secteur angulaire défini afin de lutter contre le déséquilibre actuel? D'où vient l'information? Quel phénomène déclenche cette réaction?

- quelle relation physiologique existe-t-il entre les branches vertes en croissance et les fortes contraintes rencontrées à proximité?.

Encore une fois il est nécessaire de considérer ce problème de manière dynamique et seul les observations anatomiques pourront nous permettre de clarifier ces situations.

IX - ANALYSE DES FENTES EN BOUT

Les premières observations effectuées sur les billons échantillons (sur des billons de 50cm en moyenne, à ≈15cm des couronnes de mesure) nous permettent de dégager des constatations intéressantes à partir des niveaux de déformations relevées arbre sur pied (voir ANNEXE III):

- aucune relation n'est visible entre l'extension des fentes (à 1,4m) et l'âge de l'arbre;
- aucune relation ne semble exister entre la hauteur du billon dans l'arbre et la proportion de fentes sur celui-ci;
- il n'y a pas de relation entre la longueur des fentes cumulée et le diamètre du billon;
- la moelle des Eucalyptus échantillonnés est carrée et l'on constate sans exception que les fentes s'initient toutes à un ou plusieurs de ses angles;
- les arbres présentant une forte dissymétrie des déformations fendent davantage;
- l'orientation des fentes est très bien reliée à l'orientation du maximum de dissymétrie sur le billon, réajustée par l'orientation des angles de la moelle (qui provoque de une à quatre fentes suivant l'intensité et la répartition de la dissymétrie).
- que l'hybride PF1 fend moins que le 12ABL (surtout pour le clone 2-3), le niveau de déformations moyen légèrement plus élevé de ce dernier explique en partie ce phénomène. Il faut également, si l'on veut être rigoureux, en rechercher la cause en

comparant les caractéristiques aux états limites (contraintes de rupture et fissilité) de ces deux hybrides, voir des différents clones.

Il est très intéressant de remarquer que les mesures périphériques permettent autant d'observations d'un grand intérêt pour l'analyse des fentes, alors que l'on pouvait s'attendre à un problème plus complexe nous contraignant à une étude sur la répartition interne du bois de tension en l'absence d'autres singularités (intégration de toute l'histoire et de la dynamique de la mise en place du bois). Toutefois, il sera nécessaire à l'avenir d'étudier les fentes directement au niveau des couronnes de mesure et les répartitions internes des différentes qualité de bois pour valider ces résultats.

CONCLUSION

L'étude menée ici sur les contraintes de croissance, semble à notre connaissance, la toute première de cette ampleur à utiliser du matériel clonal et cela grâce aux progrès importants réalisés en ce domaine depuis quelques années par les généticiens et les forestiers des plantations congolaises d'Eucalyptus. Des résultats originaux ont alors été mis en lumière et plus particulièrement:

- l'évidence d'un bois normal "standard" et d'un bois de tension très variable au regard des déformations résiduelles longitudinales périphériques (DRLP).
- lorsqu'on observe peu d'invidus la faible influence de l'écartement sur le niveau des DRLP en l'absence d'éclaircie qui elle semble déstabiliser le peuplement.
- le peu d'évolution systématique avec l'âge et la hauteur des DRLP malgré des variations importantes de certains paramètres anatomiques.
- la liaison évidente entre la branchaison liée à la morphologie de l'arbre (en partie sous contrôle génétique) et le niveau des contraintes de croissance.
- l'importance de la structure de la moelle et de la dissymétrie des DRLP sur l'apparition et l'extension des fentes en bout.
- enfin, il semblerait que le niveau moyen des DRLP et également de certains paramètres mécaniques du bois soient en partie contrôlés génétiquement et présente une variabilité intéressante pour le sélectionneur.

A la suite de cette étude, nos recherches s'orientent vers deux axes principaux:

- l'étude anatomique qui pourra nous fournir une quantité importante d'informations essentielles, comme la liaison entre la déformation résiduelle longitudinale périphérique et le type d'éléments ligneux ou de structures pariétales rencontrés au point de mesure. Par la suite ces informations (une fois accomplie l'étude mécanique de la méthode des deux rainures afin de remonter aux déformations de maturation) nous fourniront, pour chaque type de bois cartographié au niveau d'une rondelle, une valeur estimée de α_{LL} . Les simulations numériques basées sur le modèle de M. FOURNIER pourront alors nous fournir une cartographie des contraintes de croissance pour chaque rondelle étudiée. Par la suite, sur cette base, les effets des différents modes de débit pourront être étudiés.
- l'étude des caractéristiques mécaniques du bois aux états limites (contraintes de rupture et fissilité) afin d'évaluer le risque de fendage par une analyse théorique mécanique des redistributions de contraintes dues à l'abattage et au billonnage, de l'initiation et de la propagation des fentes dues à cette redistribution.

Pour finir, il semble que ces travaux, dans l'état actuel de nos connaissances, pourront déboucher sur la mise au point d'un outil: d'une part, de sélection pour les généticiens afin de proposer des Eucalyptus aptes à la transformation en bois d'œuvre, d'autre part, d'investigation pour le technologue.

ANNEXE I

EXEMPLES DE FICHES DE RESULTATS

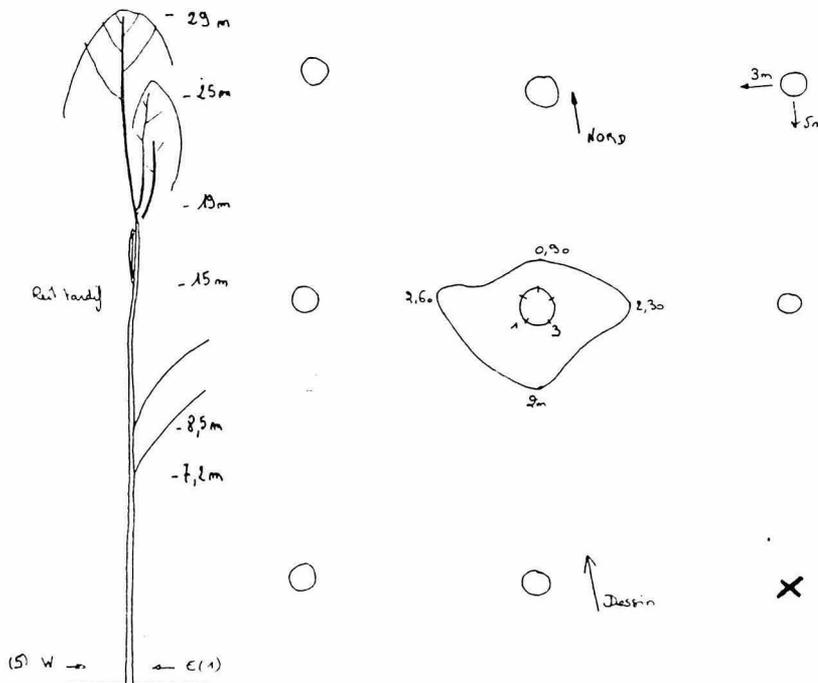
AGE (mois): 105
 ESPACEMENT (m): 5x3
 DIAMETRE (cm) à 1,4m sous écorce: 20
 HAUTEUR TOTALE (m): 29
 HAUTEUR première branche verte (houppier): 25
 HAUTEUR première réitération: 7,2
 INCLINAISONS: 1,4% ORIENTATIONS: NO

ORIENTATION des lignes: O

REMARQUES: Mauvais élagage naturel. Ecorce fissurée à la base. Petite fente à l'abattage.

Pour les mesures arbre abattu, lors du billonnage d'importantes fentes sont apparues sur la plupart des billons.

TYPES DE MESURES	HAUTEUR COURONNE	ORIENTATION MESURE 1	REPERAGE BILLON	LECTURE								REMARQUES
				1	2	3	4	5	6	7	8	
HBM	1,4	SO	32-10	76		65		114	62	60		Mesure refaite sur 5
HBM	3,1	SO	32-12	54		130		71		55		Diamètre SE = 18 Mesure refaite sur 3= 105
HBM	5,5	SO	32-13	83		116		138		103		Diamètre SE = 16
CTFT	0,4	SO	32-11	74		62		102		59		Diamètre SE = 22
CTFT	1,4	SO	32-10	67		71		84	66	79		
CTFT	3,1	SO	32-12	74		83		78		70		



79-1

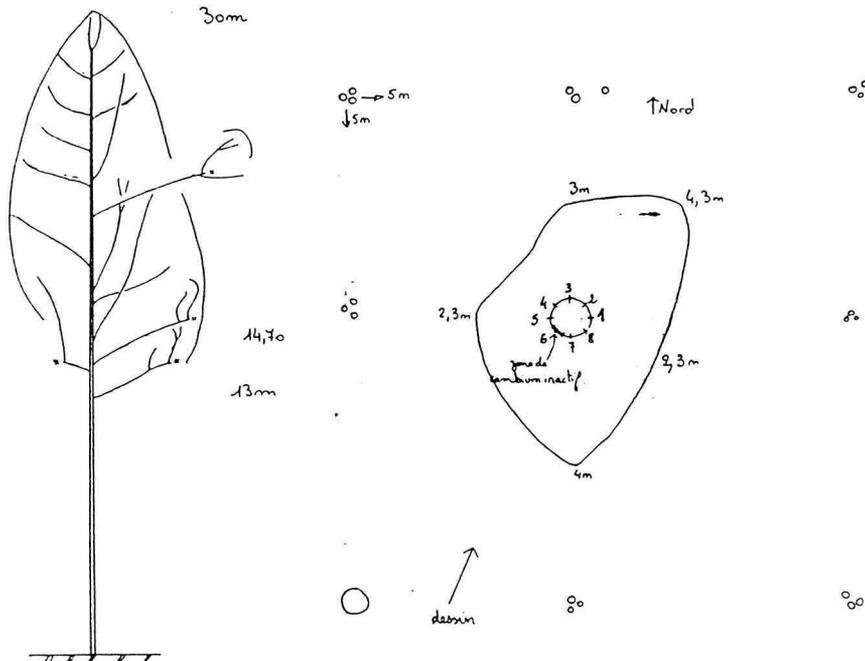
1-45

AGE (mois): 142
 ESPACEMENT (m): 5x5
 DIAMETRE (cm) à 1,4m sous écorce: 22
 HAUTEUR TOTALE (m): 30
 HAUTEUR première branche verte (houppier): 14
 HAUTEUR première réitération: 13
 INCLINAISONS: 3% ORIENTATIONS: N
 3% E

ORIENTATION des lignes: N

REMARQUES: Cambium inactif dans certaines zones à la base. Peuplement éclairci: parcelle à poteau.

TYPES DE MESURES	HAUTEUR COURONNE	orientation MESURE 1	REPERAGE BILLON	LECTURE								REMARQUES
				1	2	3	4	5	6	7	8	
HBM	1,4	E	79-10	238	127	81	73	72	35	188	95	bourgeon dormant au-dessus de la 8
HBM	3,1	E	79-12	160		67		83		61		
HBM	5,5	E	79-13	60		102		56		68		Diamètre SE= 19cm
CTFT	0,8	E	79-11	173		83		91		179	165	
CTFT	1,4	E	79-10	196	95	90		67	58	154	134	
CTFT	3,1	E	79-12	160		88		55		48		
CTFT	5,5	E	79-13	82		99		90		79		



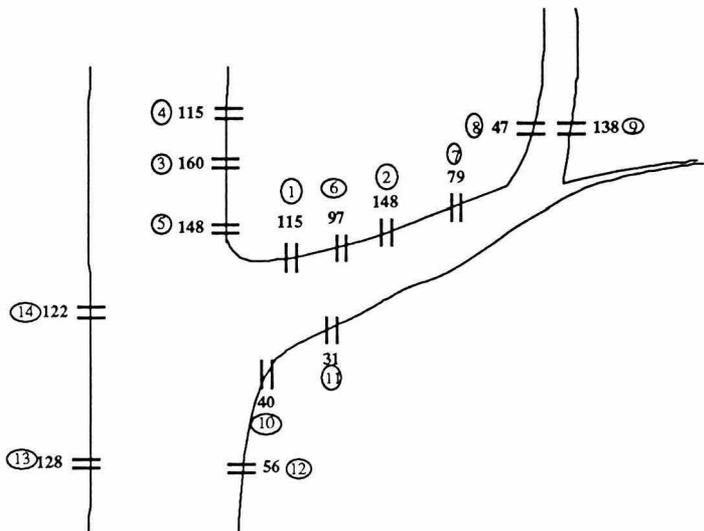
Réitération

1-45

* Cette réitération a été prélevée sur un arbre de bordure de diamètre= 22cm à 1,4m. Des mesures ont été effectuées à cette hauteur avec le système CTFT:

TYPES DE MESURES	HAUTEUR COURONNE	orientation MESURE 1	REPERAGE BILION	LECTURE								REMARQUES
				1	2	3	4	5	6	7	8	
CTFT	1,4	-----	-----	86		88		100		60		

* Les mesures sur la réitération ont été effectuées à l'aide du capteur HBM. Les valeurs notées en gras sont les mesures relevées, celles entourées d'un rond sont les repères des échantillons prélevés.



ANNEXE II

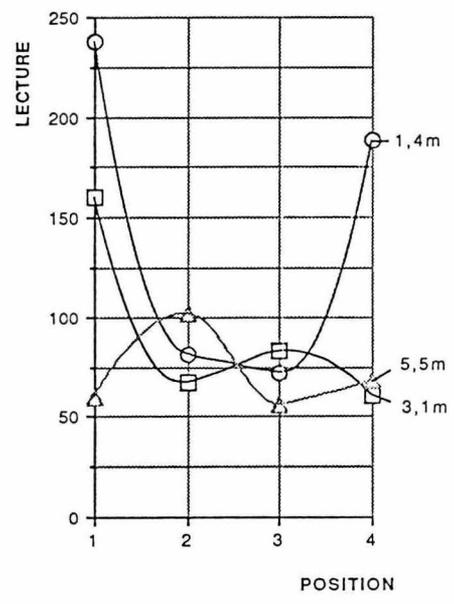
VARIATION DES DEFORMATIONS
RESIDUELLES LONGITUDINALES
PERIPHERIQUES AVEC LA HAUTEUR ARBRE
DEBOUT

MITUTOYO = Capteur CTFT
 Lecture en $\mu\text{m\AA}$

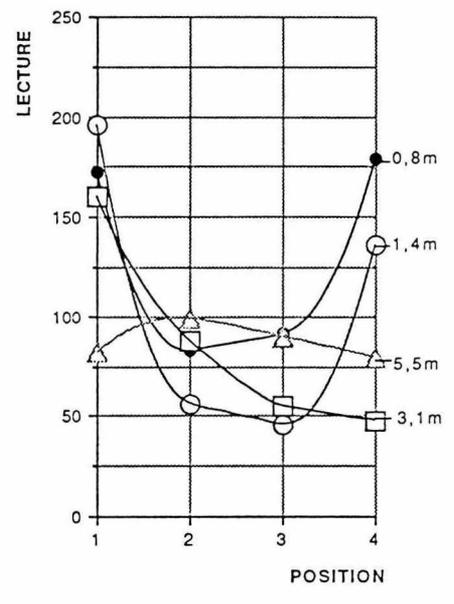
HBM Lecture en mV
 $1\text{ mV} = 14\ \mu\text{m\AA}$

1 = 0°
 2 = 90°
 3 = 180°
 4 = 270°

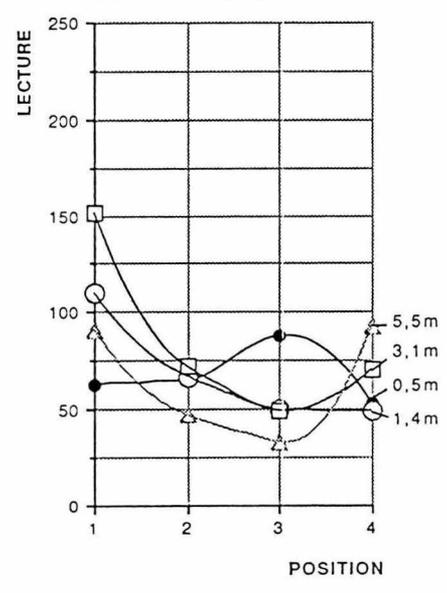
VARIATIONS DES DEFORMATIONS PERIPHERIQUES (MESURES HBM) AVEC LA HAUTEUR/ARBRE 79-1/



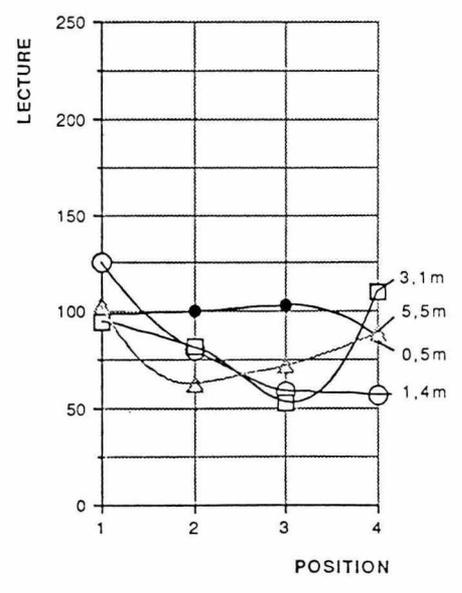
VARIATIONS DES DEFORMATIONS PERIPHERIQUES (MESURES MITUTOYO) AVEC LA HAUTEUR/ARBRE 79-1/



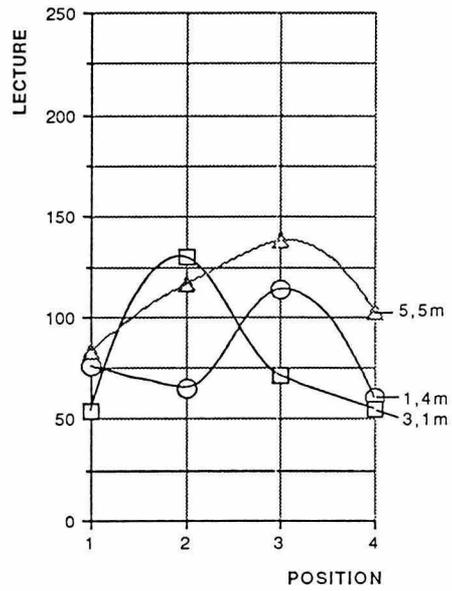
VARIATIONS DES DEFORMATIONS PERIPHERIQUES (MESURES HBM) AVEC LA HAUTEUR/ARBRE 84-2/



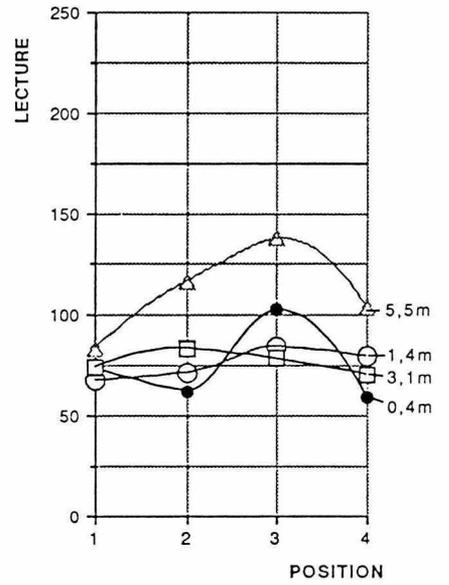
VARIATIONS DES DEFORMATIONS PERIPHERIQUES (MESURES MITUTOYO) AVEC LA HAUTEUR/ARBRE 84-2/



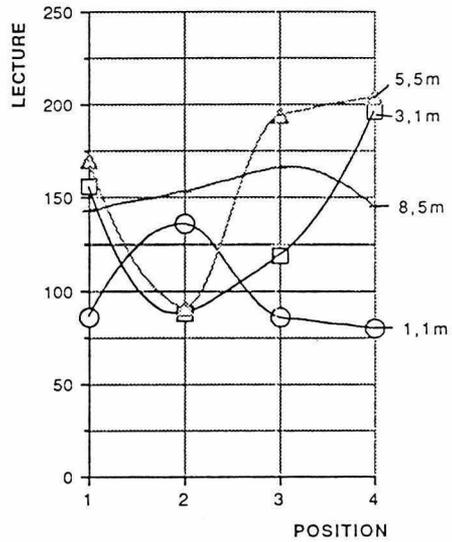
VARIATIONS DES DEFORMATIONS PERIPHERIQUES (MESURES HBM) AVEC LA HAUTEUR/ARBRE 2.32-1/



VARIATIONS DES DEFORMATIONS PERIPHERIQUES (MESURES MITUTOYO) AVEC LA HAUTEUR/ARBRE 2.32-1/

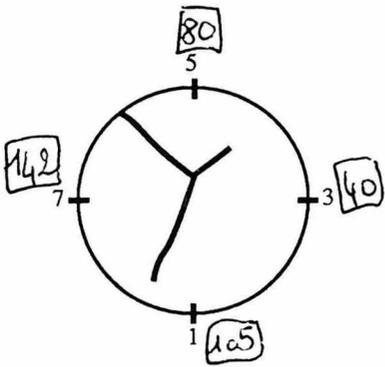


VARIATIONS DES DEFORMATIONS PERIPHERIQUES (MESURES HBM) AVEC LA HAUTEUR/ARBRE 2.3-3/

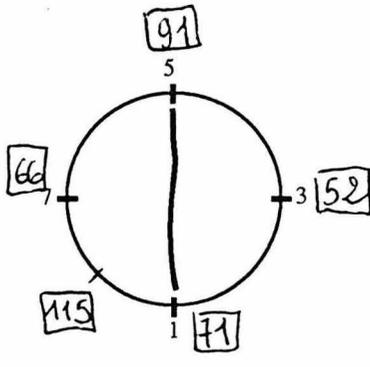


ANNEXE III

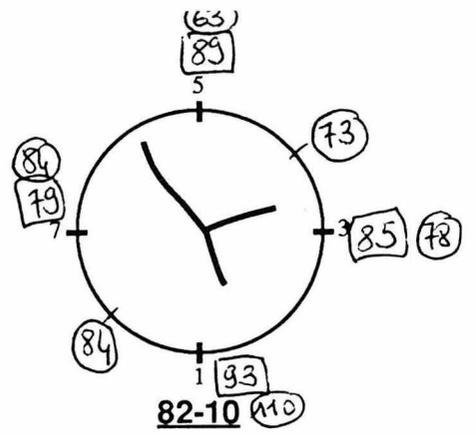
CARTOGRAPHIE DES FENTES EN BOUT DES
BILLONS ECHANTILLONS



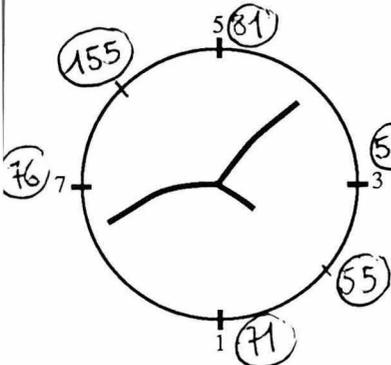
84-31



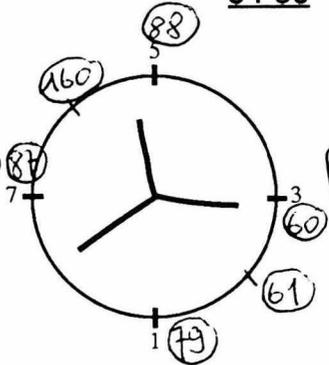
84-30



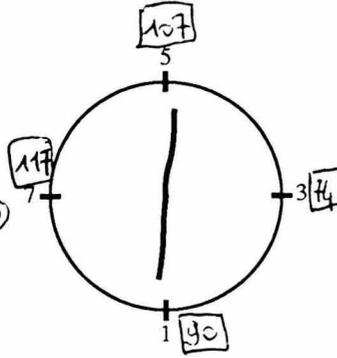
82-10



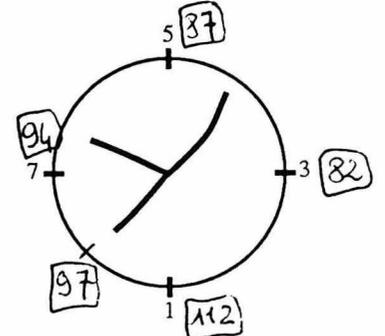
82-21



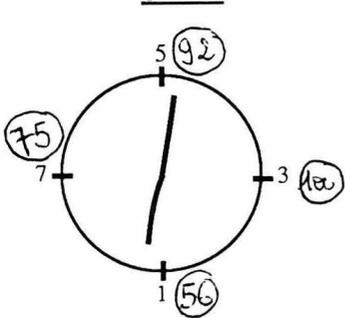
82-20



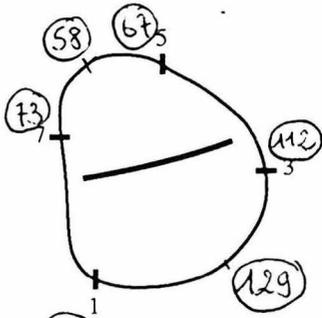
82-22



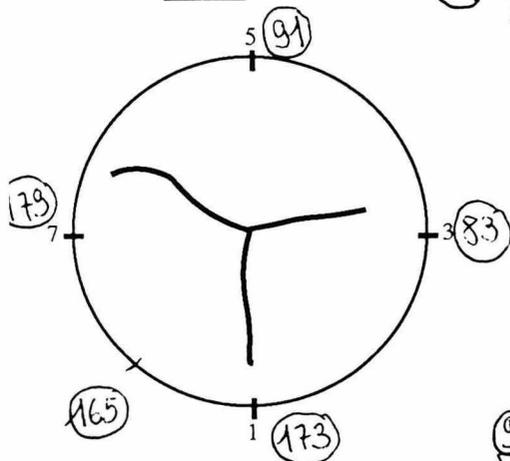
82-23



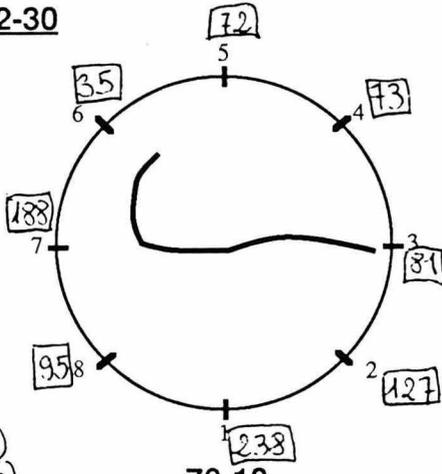
82-31



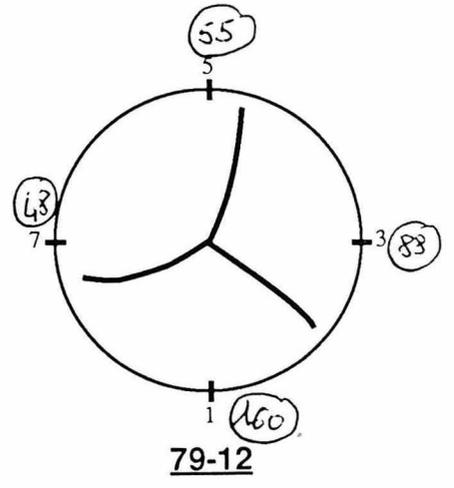
82-30



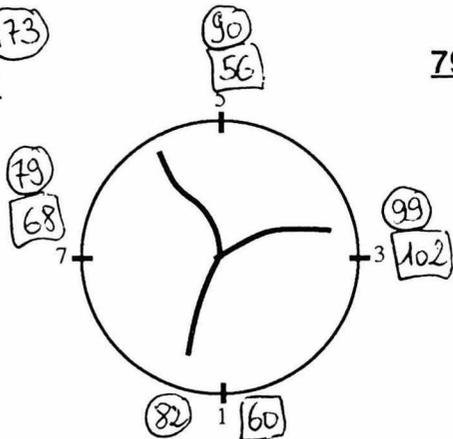
79-11



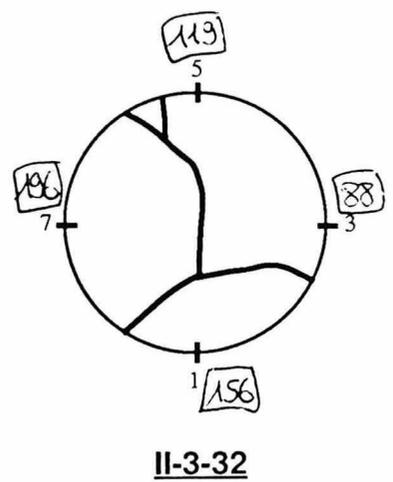
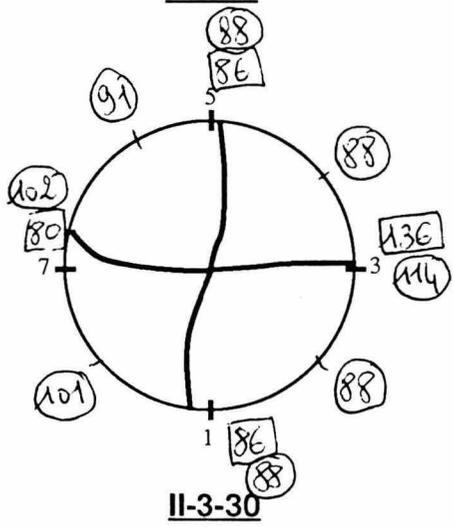
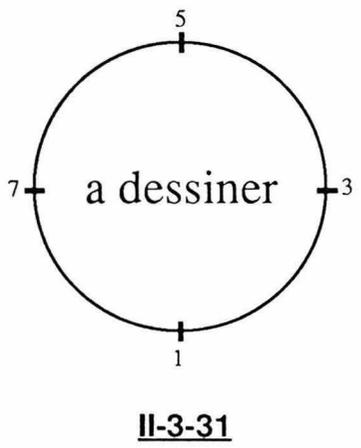
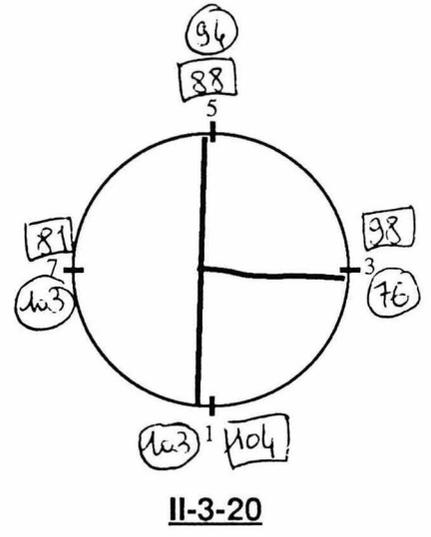
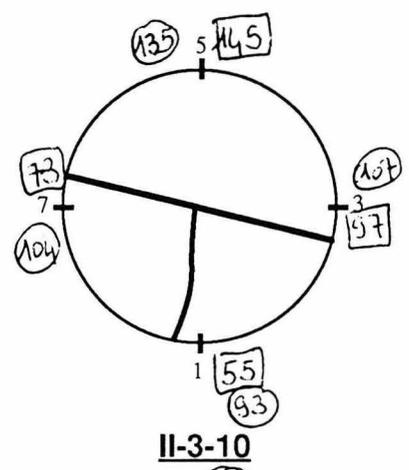
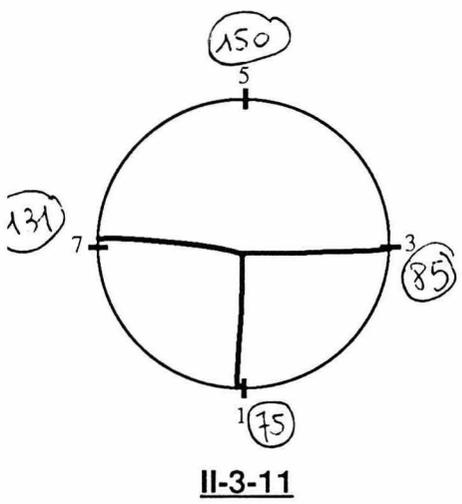
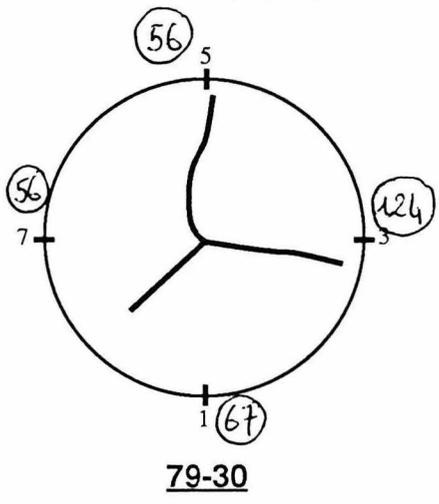
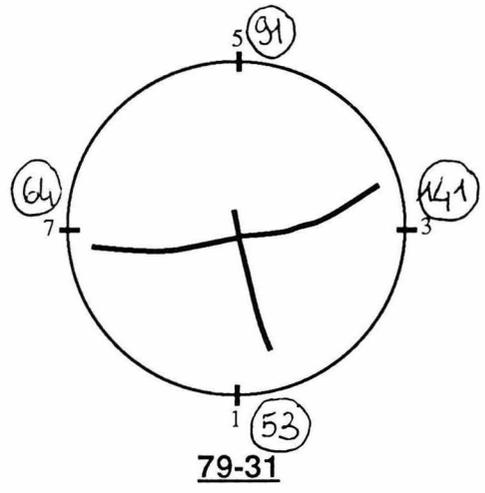
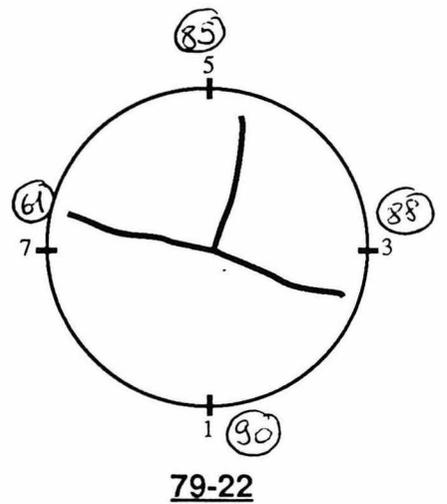
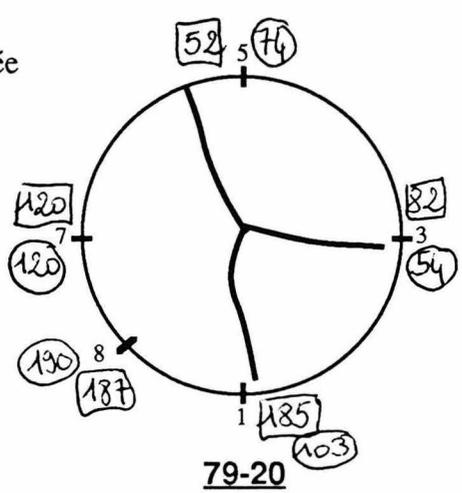
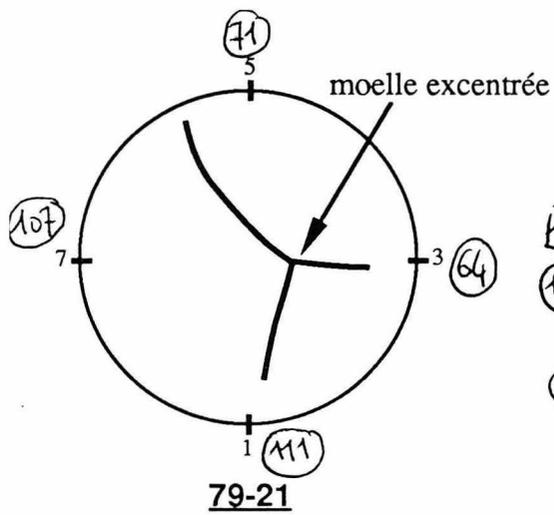
79-10

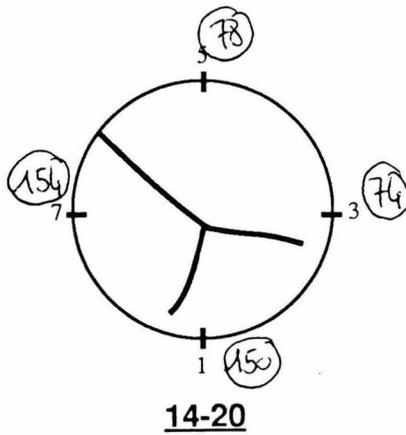
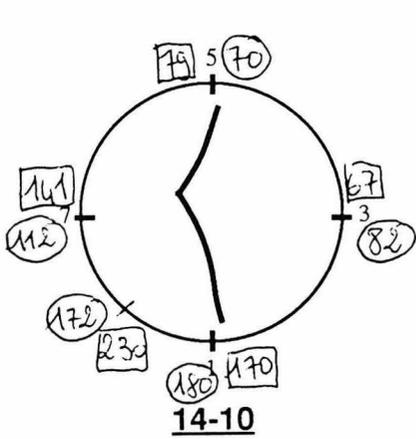
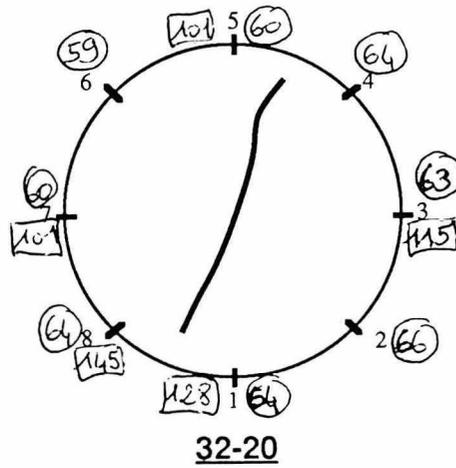
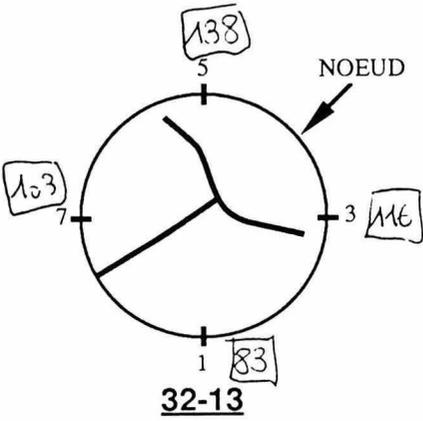
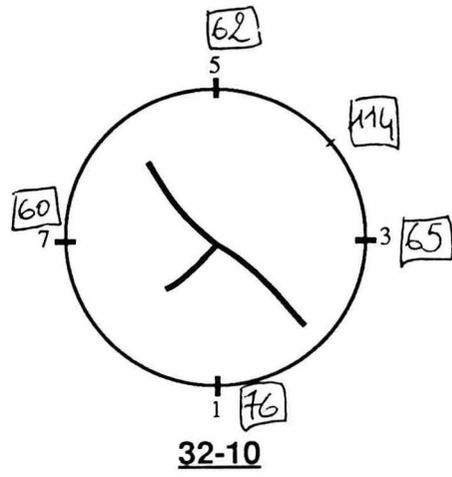
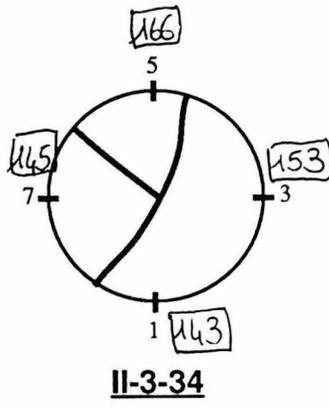
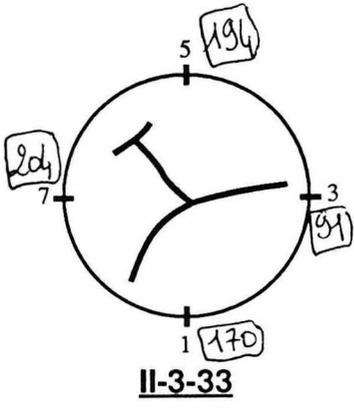


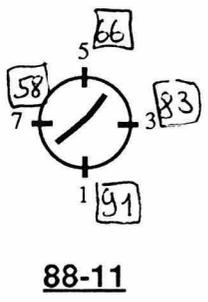
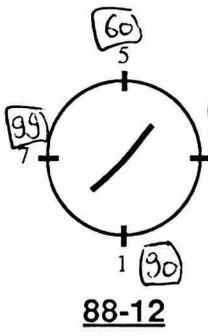
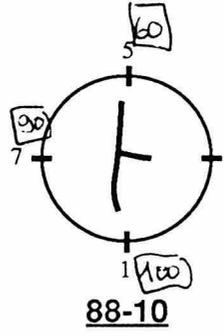
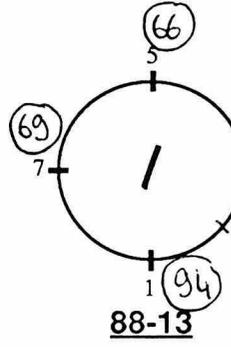
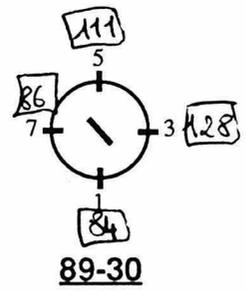
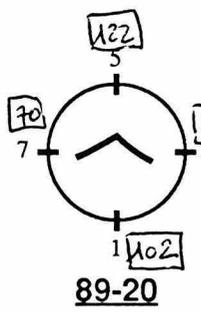
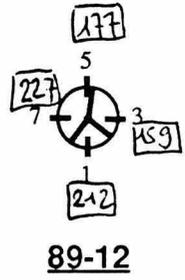
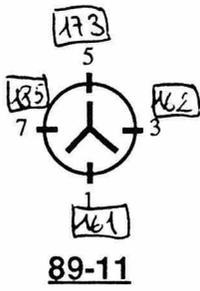
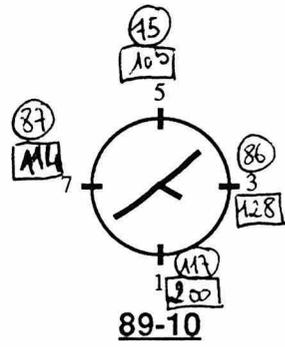
79-12



79-13

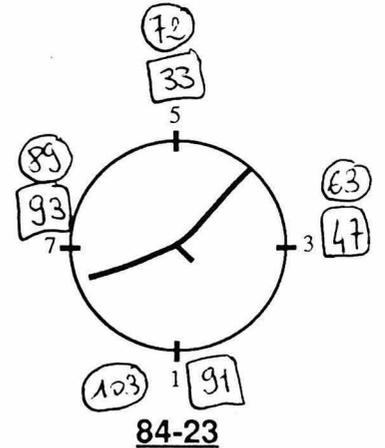
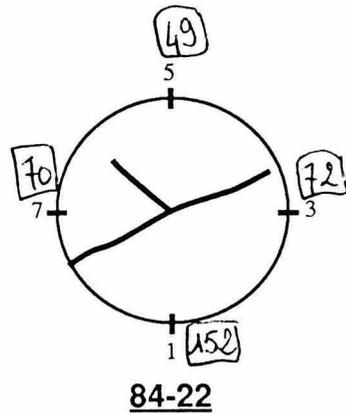
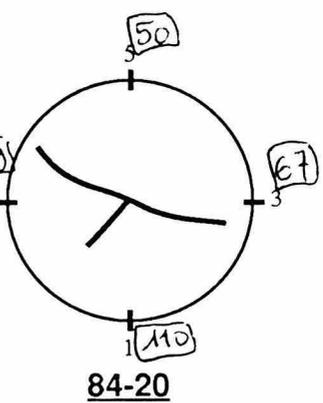
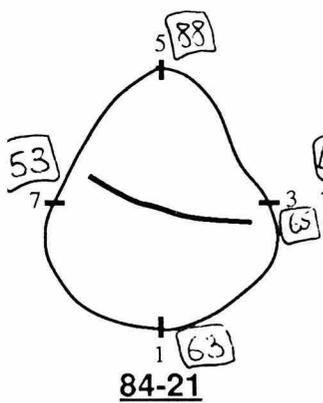
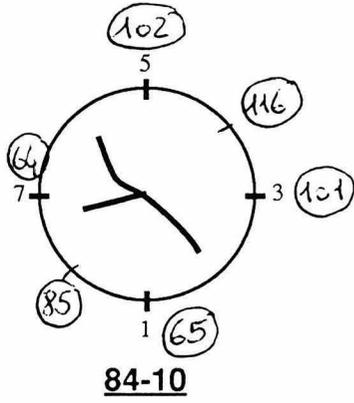
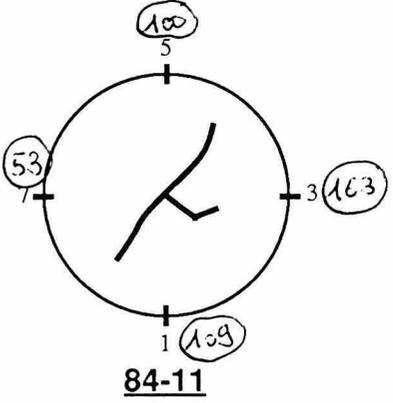
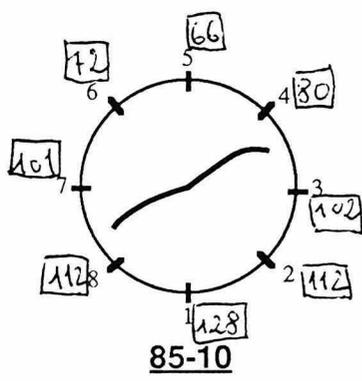
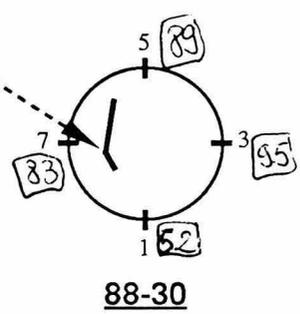
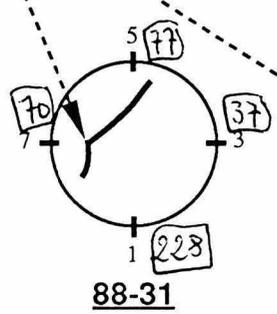
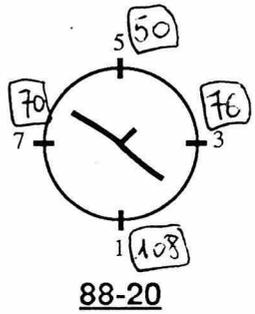
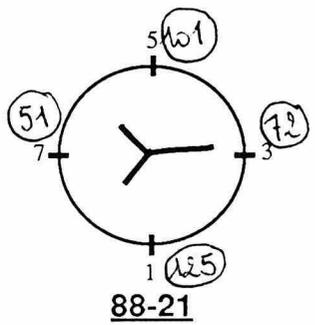






□ Captain HBM
○ Captain CTFT

moelle excentrée



BIBLIOGRAPHIE

ARAKI N.

FUJITA M., SAIKI H., HARADA H.

Transition of the fiber wall structure from normal wood to tension wood in Robinia pseudoacacia L. and Populus euramericana G.

Mokuzai Gakkaishi (Vol.28; N°5)

- 1982 -

pages 267 à 273

ARCHER R.R.

BYRNES F.E.

On the distribution of Tree Growth Stresses Part 1 : An Anisotropic Plane Strain Theory.

Wood Science and Technology (Vol.8)

- 1974 -

pages 184 à 196

ARCHER R. R.

On the distribution of Tree Growth Stresses, Part 2 : Stresses due to asymmetric growth strains.

Wood Science and Technology (Vol 10)

- 1976 -

pages 293 à 309

ARCHER R.R.

BYRNES F.E.

Relief of growth stresses in trees as an "end problem" for transversely isotropic cylinders.

Recent Advances in Engineering Science (Vol.8)

- 1977 -

pages 291 à 298

ARCHER R. R.

On the distribution of Tree Growth Stresses, Part 3: the case of inclined grain.

Wood Science and Technology (Vol 13)

- 1979 -

pages 67 à 78

ARCHER R. R.

On the distribution of Tree Growth Stresses, Part 4 : The general case allowing Longitudinal and Circumferential Variation of Growth Stresses.

Wood Science and Technology (Vol.15)

- 1981 -

pages 201 à 209

ARCHER R. R.

On the distribution of Tree Growth Stresses, Part 5 : Asymmetric peripheral growth strains with orthotropic material behavior.

Wood Science and Technology (Vol.19)

- 1985 -

pages 259 à 276

ARCHER R.R.

Growth Stresses and strains in trees.

Springer Verlag - Springer series in wood science - Editor: E. TIMELL

- 1986 -

240 pages

ARCHER R.R.

Application of a new method for growth stress measurement to *Pinus caribaea*.

Proc. IUFRO Proj. Group. P.5.01. Properties and utilization of tropical woods, Manaus, Brazil (19-23 novembre 1984)

- 1986 -

15 pages

ARCHER R.R.

On the origin of growth stresses in trees, Part1 : Micromechanics of the developing cambial cell wall.

Wood Science and Technology (Vol.21)

- 1987 -

pages 139 à 154

ARCHER R.R.

On the relation of strains induced in the developing cell walls to the growth stresses in the tree.

IUFRO/P5.01 conference on Properties and Utilization of fast growth species planted in tropical areas (15-20 mai 1988 , Sao Paulo, Brésil)

- 1988 -

10 pages

ARGANBRIGHT D.G.

BENSEND D.W., MANWILLER F.G.

Influence of Gelatinous Fibers on the shrinkage of Silver Maple.

Wood Science (vol.3, N°2)

- 1970 -

pages 83 à 89

BAMBER R.K.

The origin of growth stresses : A rebutal.

IAWA Bulletin n.s. (Vol.8, N°1)

- 1987 -

pages 80 à 84

BANDYOPADHYAY N.

ARCHER R.R.

Relief of growth stresses in planks.

Holzforschung (Vol.33, N°2)

- 1979 -

pages 43 à 46

BANDYOPADHYAY N.

ARCHER R.R.

Semi-analytical finite element analysis of end problems for orthotropic cylinders.

International Journal Solids Structures

- 1979 -

pages 871 à 883

BARISKA M.

Selected properties of eucalypt mining timber - part I: A predictive assessment technique for split development in five species shortly after felling.

rapport interne: Department of Wood Science - Faculty of Forestry - University of Stellenbosch - South Africa

- Avril 1989 -

54 pages

BECK J.L.

Anisotropic theory of growth stresses in trees.

Department of Scientific and Industrial Research, Lower Hutt, New Zealand, report N°452

- 1974 -

12 pages

BEGE P.

Détermination de la distribution des contraintes de croissance dans les essences feuillues - Analyse des résultats en métropole.

Compte rendu de fin d'étude DGRST , CTBA, Paris

- 1982 -

20 pages

BERGONZINI J.C.

Proposition pour le traitement d'un essai écartement réalisé suivant le dispositif apparenté au plan dit de "MARYNEN".

Communication interne CTFT Nogent - division biométrie.

- 1984 -

22 pages

BORDONNE P.A.

OKUYAMA T., YAMAMOTO H., IGUCHI M.

Relationships between growth stresses and microfibril angle in the cell wall.

Communication au colloque IAWA-IUFRO du 15/12/87 au CTBA (Paris)

- 1987 -

8 pages

BOULET GERCOURT B.

Fentes des arbres chez *Abies Grandis* (Lindl). Recherche de paramètres de structure pouvant expliquer la sensibilité de certains individus à ce défaut.

DEA Sciences du Bois INRA SRQB, INP de Lorraine

- 1986 -

40 pages

- BOULET-GERCOURT B.** **NEPVEU G.**
Relation entre certaines propriétés du bois et les fentes des arbres sur pied chez *Abies grandis* (Lindl.).
- Annales des Sciences Forestières (Vol.45, N°1)
- 1988 - pages 33 à 52
- BOYD J.D.**
Tree Growth Stresses - I. Growth stress evaluation.
- Australian Journal Science Research (Vol 3)
- 1950 - pages 270 à 293
- BOYD J.D.**
Tree growth stresses -V. Evidence of an origin in differentiation and lignification.
- Wood Science and Technology (Vol.6)
- 1972 - pages 251 à 262
- BOYD J.D.**
Relationships between Fibre Morphology, Growth strains and physical properties of Wood.
- Australian Forestry Research (Vol.10)
- 1980 - pages 337 à 360
- BOYD J.D.**
The key facteur in growth stress generation in trees : lignification or crystallisation.
- IAWA Bulletin (Vol.6, N°2)
- 1985 - pages 139 à 150
- BREMOND C.** **GUITARD D.**
Apparition des contraintes internes dans les solides à symétrie matérielle orthotrope cylindrique: cas des contraintes internes dans le bois.
- Actes du Colloque Sciences et Industries du Bois, édité par le C.T.B.A.
- 20-22 Septembre 1986 - 6 pages
- BUCUR V.**
L'angle des microfibrilles, méthodes de mesure - Etude bibliographique.
- Station Qualité des Bois, I.N.R.A. (Centre de Recherches Forestières Champenoux) Document 1982/1.
- 1982 - 20 pages

CARRE S.

La filière Eucalyptus en République Populaire du Congo.

Rapport D.E.R.F. et U.A.I.C.

- Novembre 1987 -

36 pages

CHAFE S.C.

Growth stress in trees.

Australian Forest Research (Vol.9, N°3)

- 1979 -

pages 203 à 223

CHAFE S.C.

Wood hardness as a poor indicator of growth stress

Australian Forest Research (Vol.9, N°2)

- 1979 -

pages 203 à 223

CHARDIN A.

KAUMAN W., OKUYAMA T., SALES C.

Retrait et comportement mécanique différé en liaison avec le niveau des contraintes de croissance.

Revue Bois et Forêts des Tropiques- N°8 - Centre technique Forestier Tropical, Nogent sur Marne.

- 1986 -

15 pages

CHARDIN A.

DE LAFOND C., SALES C., THIEL J.

Etude des espèces à fortes contraintes de croissance de la forêt naturelle de Guyane.

Revue Bois et Forêts des Tropiques - N° 8 - Centre technique Forestier Tropical, Nogent sur Marne.

- 1986 -

pages 13 à 35

CHARDIN A.

Les contraintes de croissance du wapa: étude en vue de déterminer "les conditions d'utilisation du wapa, principale essence de Guyane".

Compte rendu de fin d'étude, CTFT.

- Juin 1984 -

140 pages

CINOTTI B.

Influence de la structure du bois des chênes sur leur sensibilité à la gélivure.

DEA Sciences du Bois - Station Qualité des Bois, I.N.R.A. (Centre de Recherches Forestières Champenoux) - ENGREF

- 1987 -

40 pages

CINOTTI B.

La gélivure des Chênes: front de gel source de contraintes internes, incidence des propriétés anatomiques et mécanophysiques.

Thèse de Doctorat en Sciences du Bois de l'I.N.P. de Lorraine

-1989 -

120 pages

CLARKE S.H.

The distribution, structure and properties of tension wood in beech (*Fagus Sylvatica* L.).

Journal of Forestry (Vol.XI, N°2)

- 1973 -

pages 85 à 91

DE REFFYE Ph.

EDELIN C., JAEGER M., CABART C.

Simulation de l'architecture des arbres.

Naturalia monspeliensia - Colloque international sur l'arbre

- 1986 -

pages 223 à 240 -

DETIENNE P.

PAQUIS J.

Tentative de délimitation du bois juvénile dans 3 *Eucalyptus* hybrides du Congo.

Rapport interne C.T.F.T. Division d'Anatomie des Bois

- 1989 -

10 pages

DURAND P.Y.

Mission d'appui à l'Unité d'Afforestation Industrielle du Congo: 1- Conditionnement des rondins et poteaux bruts. 2- Proposition de recherche sur les potentialités technologiques des plantations multi- et mono-clonales d'*Eucalyptus*.

Etude financée par le fond d'aide et de coopération de la République Française - Rapport C.T.F.T.

- Février 1987 -

30 pages

EI AMRI F.

Contribution à la modélisation élastique anisotrope du matériau bois, Feuillus et résineux.

Thèse de Doctorat en Sciences du Bois de l'I.N.P. de Lorraine

-1987 -

140 pages

F.A.O.

Les eucalyptus dans les reboisements.

Collection fao: Forêts

- 1982 -

753 pages.

FERRAND J.C.

Etude des contraintes de croissance:

- première partie: méthode de mesures sur carottes de sondage.
- deuxième partie: variabilité en forêt des contraintes de croissance du hêtre (*Fagus sylvatica*).
- troisième partie: *Eucalyptus delegatensis* et *Eucalyptus nitens*: influence de la sylviculture et Annales des sciences forestières (2, 3 et 4)

- 1982 -

90 pages en 3 articles

FERRAND J.C.

Un capteur d'extensométrie miniature à deux voies.

Annales des Sciences Forestières (Vol.39)

- 1982 -

pages 143 à 150

FERRAND J.C.

Recherche des solutions pratiques à apporter aux problèmes posés par les contraintes de croissance des arbres forestiers.

Thèse Sciences du Bois 3^e cycle - INPL

- Décembre 1981 -

200 pages

FOUDJET A.

Contribution à l'étude rhéologique du matériau bois.

Thèse d'Etat - Université de Lyon 1

- 1986 -

140 pages

FOURNIER M.

LANGBOUR P., GUITARD D., BORDONNE P.A., SALES C.

Fast growth species - Strains and stresses in a living tree stem.

Voluntary paper, IUFRO/P5.01 conference on Properties and Utilization of fast growth species planted in tropical areas, Sao Paulo, Brésil.

- 1988a -

20 pages

FOURNIER M.

BORDONNE P.A., GUITARD D.

Modélisation des contraintes de croissance. Evolution avec l'âge de l'arbre des déformations de maturation dans les couches externes.

Publication aux actes du colloque scientifique européen sur le comportement mécanique du bois le 8/9 Juin, Bordeaux (Chap.XII, §1)

- 1988b -

pages 409 à 420

FOURNIER M.

LANGBOUR P.

Evaluation de l'état des contraintes à la surface des arbres sur pied (technique utilisant des moyens extensométriques classiques sur le principe d'une découpe induisant une perturbation connue).

Document de travail non publié

- 1989b -

28 pages

FOURNIER M.

LANGBOUR P.

Mécanique de l'arbre sur pied: les relevés dendrométriques classiques pour quantifier les efforts gravitationnels supportés par un tronc - leurs limites -

Annales des Sciences Forestières (Vol.21).

- 1990a -

pages 565 à 577

FOURNIER M.

BORDONNE P.A., GUITARD D., OKUYAMA T.

Growth stress patterns in tree stems : a model assuming evolution with the tree age of maturation strains.

Wood Science and Technology (Vol.24).

- 1990b -

pages 131 à 142

FOURNIER M.

CHANSON B., GUITARD D., THIBAUT B.

Mécanique de l'arbre sur pied: modélisation d'une structure en croissance soumise à des chargements permanents et évolutifs.-Partie 1: Analyse des contraintes de support.-Partie 2: Analyse tridimensionnelle des contraintes de maturation - Cas du feuillu standard.

Annales des Sciences forestières (Vol.48).

- 1991 -

pages 513 à 525

FOURNIER M.

Mécanique de l'arbre sur pied: maturation, poids propre, contraintes climatiques dans la tige standard.

Thèse Sciences du Bois 3° cycle

- Novembre 1989b -

257 pages

FOURNIER M.

Evaluation des déformations de maturation à la surface de jeunes arbres.

Compte rendu 1° serie de manipulations

- octobre 1990c -

15 pages

GAUTHERIN M.T.

Critère de contrainte limite du bois massif.

Thèse présentée à l'Université de Paris VI

- 1980 -

140 pages

GERARD J.

Mise en place d'une méthodologie de caractérisation des Eucalyptus de plantation à croissance rapide.

Rapport intermédiaire couvrant la première tranche de la convention FFN/CTFT

- 1990 -

24 pages

GILLIS P.P.

Theory of growth stresses.

Holzforschung (B.27, H.6)

- 1973 -

pages 197 à 207 -

GILLIS P.P.

HSU C.H.

An Elastic, Plastic Theory of Longitudinal Growth Stresses.

Wood Science and Technology (Vol 13).

- 1979 -

pages 97 à 115

GIORDANO G.

CURRO P., GHISI G.

Contribution to the study of internal stresses in the wood of Eucalyptus.

Wood Science and Technology (Vol 3)

- 1969 -

pages 1 à 13

GRIL J.

Une modélisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure.

Thèse de l'Université Paris VI

- 1988 -

140 pages

GUENEAU P.

Contraintes de Croissance.

Cahiers Scientifiques N°3 de Bois et Forêts des Tropiques, Centre technique Forestier Tropical,
Nogent sur Marne

- 1973 -

30 pages

GUENEAU P.

SAURAT J., TRENARD Y.

Contraintes de croissance.

Rapports du Centre technique du Bois, Paris

- 1974 -

50 pages

GUITARD D.

Mécanique du matériau bois et composites.

Collection Nabla Cépadues-Editions

- 1987 -

238 pages

HILLIS W.E.

Some basic characteristics affecting wood quality.

Appita, CSIRO Division of Building Research Australia (Vol.33, N°5).

- 1980 - 20 pages

JACOBS M.R.

Stresses and strains in tree trunks as they grow in length and width.

Leaflet, Forestry and Timber Bureau, Australia (N° 96).

- 1965 - 25 pages

KRILOV A.

Non-destructive measurement of growth stresses in living tree:

- PART 1: measurement of surface displacements by S.M.A. technique.

- PART 2: field testing of S.M.A. mark 2 in plantation grown Eucalyptus pilularis SM.

IUFRO SYMPOSIUM - Intensive forestry: the role of eucalypts - Vol. 2 - productivity of eucalypts -

- septembre 1991 - pages 1002 à 1025

KUBLER H.

Sylvicultural Control of Growth Stresses.

Notes personnelles, Non publié

- 1987b - 30 pages

KUBLER H.

Growth Stresses in trees and Related Wood Properties. (*Bibliographie très étendue sur les contraintes de croissance*).

Forestry Abstracts (revue bibliographique)

- Mars 1987a - 58 pages

LANGBOUR P.

Relations entre contraintes de Croissance et veine verte chez le Merisier (*Prunus Avium*).

DEA Sciences du Bois, Station Qualité des Bois, I.N.R.A. (Centre de Recherches Forestières Champenoux)

- 1986 - 55 pages

LANGBOUR P.

FOURNIER M., GUITARD D.

Etat mécanique d'un tronc d'arbre forestier : rigidité à la flexion.

Actes du Colloque Scientifique Européen "Rhéologie du Bois" des 8-9 juin, Bordeaux

- 1988 - pages 471 à 482

LANGBOUR P.

Rigidité de l'arbre sur pied, indicateur de l'élasticité longitudinale du bois. Application aux peupliers.

Thèse en Sciences du Bois, présentée à l'INP de Lorraine

- 1989 - 140 pages

LAUNAY

NEPVEU G., GUITARD D., BUCUR V., CARMINATI M.

Comparaison entre six méthodes d'estimation des constantes élastiques d'un épicéa de Sitka (*Picea sitchensis* Bong).

Actes du Colloque Scientifique Européen "Rhéologie du Bois", Bordeaux

- 8 et 9 Juin 1988 - pages 13 à 24

LENZ O.

STRASSLER H.J.

Contribution à l'étude de l'éclatement des billes de Hêtre (*Fagus Sylvatica*).

Mem LCS. Mitt Schweiz Anst Forst Versuchswes (Vol.35).

- 1959 - pages 369 à 411

MALAN F.S.

Studies on the phenotypic variation in growth stress intensity and its association with tree and wood properties of South African grown *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden).

Ph. D. thesis non publiée - University of Stellenbosch.

- 1984 - 180 pages

MALAN F.S.

GERSCHER G.F.R.

Wood property differences in South African grown *Eucalyptus grandis* trees of different growth stress intensity.

Holzforschung (Vol.41)

- 1987 - pages 331 à 335

MALAN F.S.

The wood properties of South African grown *Eucalyptus grandis* : some notes on their variation and association. (en 2 articles).

Wood Southern Africa (vol.14; N°5 et 6).

- 1989 - 11 pages

MALAN F.S.

The reduction of high levels of growth stress in *Eucalyptus grandis* - is tree breeding our only solution?

Wood Southern Africa (vol.12; N°10).

- August 1987 - pages 19 à 24

MALAN F.S.

Variation, association and inheritance of juvenile wood properties of *Eucalyptus grandis* with special reference to the effect of rate of growth.

South African Forestry Journal (N°157).

- June 1991 -

pages 16 à 23

MALAN F.S.

Wood density variation in four trees of South African grown *Eucalyptus grandis*.

South African Forestry Journal (N°144).

- March 1988 -

pages 36 à 42

MALAN F.S.

Relationships between growth stress and some tree characteristics in South African *Eucalyptus grandis*.

South African Forestry Journal (N°144).

- March 1988 -

pages 43 à 46

MALAN F.S.

Genetic variation in some growth and wood properties among 18 full-sib families of South African grown *Eucalyptus grandis* : a preliminary investigation.

South African Forestry Journal (N°146)

- September 1988 -

pages 38 à 44

MARIAUX A.

Structure fine du bois de Wapa en relation avec les contraintes de croissance.

Colloque Sciences et Industries du Bois, Groupe N°1, Grenoble

- 1982 -

32 pages

MARIAUX A.

VITALIS-BRUN A.

Structure fine du bois de wapa en relation avec les contraintes de croissance.

Revue Bois et Forêts des Tropiques - N° 199 - 1° trimestre 1983 -

- 1983 -

pages 43 à 56

NEPVEU G.

BARNEOUD Cl., POLGE H., AUBERT M.

Variabilité clonale des contraintes de croissance et de quelques autres propriétés du bois dans le genre *Populus* - Fiabilité de l'appréciation de la qualité du bois à l'aide de carottes de sondage.

Annales AFOCEL

- 1985 -

pages 338 à 357

NICHOLSON J.E.

A rapid method for estimating longitudinal growth stresses in logs.

Wood Science and Technology (Vol.5).

- 1971a -

pages 40 à 48

NICHOLSON J.E.

A study of longitudinal growth stress in *Eucalyptus regnans* regrowth.

Ph. D. thesis - Australian Natural University.

- 1971b -

160 pages

NICHOLSON J.E.

Growth stress differences in *Eucalyptus* Sp.

Forest Science (Vol. 19, N°3)

- 1973 -

pages 169 à 174

NICHOLSON J.E.

HILLIS W.E., DITCHBURNE N.

Some tree growth-wood property relationship of *Eucalyptus*.

Canadian Journal Forest Research (Vol.5, N°3).

- 1975 -

pages 424 à 432

OKUYAMA T.

KIKATA Y.

The generation Process of the Growth Stress and residual Stress.

XVIIth World Congress IUFRO, Japan

- 10 au 11 Septembre 1981 -

12 pages

OKUYAMA T.

KIKATA Y.

The residual stresses in wood logs due to growth stresses.

Mokuzai Gakkaishi (Vol.21).

- 1975 -

pages 326 à 327

OKUYAMA T.

KIKATA Y.

The residual stresses in wood logs due to growth stresses.

Mokuzai Gakkaishi (Vol. 21).

- 1975 -

pages 335 à 341

OKUYAMA T.

KIKATA Y.

The residual stress distribution in wood logs measured by thin layer removal method.

Journal of the Society of Materials Science Japan (Vol.24).

- 1975 -

pages 845 à 848

OKUYAMA T.

SASAKI Y.

The residual stresses in wood logs due to growth stresses. IV. The growth stresses piled in the trunk.

Mokuzai Gakkaishi (Vol.24).

- 1978 -

pages 77 à 84

OKUYAMA T.

SASAKI Y., KIKATA Y., KAWAI N.

The seasonal change in growth stress in the tree trunk.

Mokuzai Gakkaishi (Vol. 27, N°5).

- 1981 -

pages 350 à 355

OKUYAMA T.

KAWAI A., KIKATA Y.

Growth stresses and uneven gravitational-stimulus in trees containing reaction wood.

Mokuzai Gakkaishi (Vol.29).

- 1983 -

pages 190 à 196

PAYA J.M.

L'Eucalyptus au Portugal: étude des possibilités industrielles de transformation et de valorisation par sciage.

Rapport pour la Commission des Communautés Européennes: Direction Générale de la Science, de la recherche et du développement - Bourse sectorielle N°B/87000651

- Octobre 1989 -

115 pages

POLGE H.

THIERCELIN F.

Growth stress measurement through increment core measurement.

Wood Science (Vol.12).

- 1979 -

pages 86 à 92

POLGE H.

Influence des éclaircies sur les contraintes de croissance du hêtre.

Annales des Sciences Forestières (Vol.12).

- 1981 -

pages 407 à 423

POLGE H.

Influence de l'élagage sur la duraminisation, la production de bois de tension et quelques autres propriétés du bois de peuplier I. 214.

Annales des Sciences Forestières (Vol.42).

- 1985 -

pages 283 à 296

POST I.L.

An incremental longitudinal growth stress distribution model.

Holzforchung (Vol.33, N°4).

- 1979 -

pages 107 à 111

PRIEST D.T.

KNUFFEL W.E., MALAN F.S.

End-splitting in Eucalyptus grandis sawlogs and sawn timber.

Special report - National Timber Research Institute - Council for Scientific and Industrial Research

- March 1982 -

20 pages.

RAKOTOVAO G.

Mesure de la composante longitudinale des contraintes de croissance dans les grumes d'Eucalyptus.

Rapport de stage à la Division "Physique et Mécanique" du C.T.F.T.

- Juillet 1988 -

12 pages

ROBERTS L.W

GAHAN P.B., ALONI R.

Vascular differentiation and plant growth regulators.

Springer Verlag - Springer series in wood science - Editor: E. TIMELL

- 1988 -

120 pages

SASAKI Y.

OKUYAMA T., KIKATA Y.

The evolution process of the growth stress in the tree : the surface stresses on the tree.

Mokuzai Gakkaishi (Vol.24).

- 1978 -

pages 149 à 157

SASAKI Y.

OKUYAMA T., KIKATA Y.

Determination of the Residual Stress in a Cylinder of Inhomogeneous. Anisotropic Material I.

Mokuzai Gakkaishi (Vol.27, N°4)

- 1981 -

pages 270 à 276

SASAKI Y.

OKUYAMA T., KIKATA Y.

Determination of the Residual Stress in a Cylinder of Inhomogeneous. Anisotropic Material II.

Mokuzai Gakkaishi (Vol.27, N°4)

- 1981 -

pages 277 à 282

SAURAT J.

GUENEAU P.

Growth stress in beech.

Wood Science and Technology (Vol.10)

- 1976 -

pages 111 à 123

SCHÖNAU A.P.G.

Role of eucalypt plantations in timber supply and forest conservation in Sub-Saharan Africa.

South African Forestry Journal (N°156)

- Mach 1991 -

pages 56 à 60

SCHÖNAU A.P.G.

Growth, yield and timber density of short rotation coppice stands of Eucalyptus grandis .

South African Forestry Journal (N°156)

- Mach 1991 -

pages 12 à 22

SESBOU A.

NEPVEU G.

Variabilité infraspécifique du retrait après reconditionnement, du rendement papetier et de la longueur des fibres, chez Eucalyptus camaldulensis dans deux dispositifs italiens.

Annales des sciences forestières (Vol.47).

- 1990 -

pages 201 à 218

SESBOU A.

Stratégie de développement des plantations d'Eucalyptus camaldulensis au Maroc.

Thèse d'état ès sciences. Université de Bordeaux I

- Novembre 1990 -

94 pages

SKOLMEN R.G.

Shrinkage and specific gravity variation in Robusta Eucalyptus wood grown in Hawaii.

USDA Forest Service Research, Note PSW 298.

- 1975 -

15 pages

SURAN J.C.

Contribution à l'étude : - des caractéristiques physiques et mécaniques - des possibilités de mise en oeuvre sur 3 espèces et 2 clones d'Eucalyptus provenant du Congo.

Rapport de Stage au C.T.F.T. Division Essais et Emplois des Bois.

- Juin 1985 -

41 pages

TRENARD Y.

GUENEAU P.

Relations entre Contraintes de Croissance Longitudinales et Bois de Tension, dans le Hêtre (Fagus Sylvatica L.).

Holzforschung (Vol.29, N°6).

- 1975 -

pages 217 à 223

WILHELMY V.

KUBLER H.

Stresses and Checks in Log Ends From Relieved Growth Stresses.

Wood Science (Vol 6, N°2).

- 1973 -

pages 136 à 142

WILSON B.F.

ARCHER R.R.

Reaction wood : induction and mechanical action.

Annual Review of Plant Physiology (Vol.28)

- 1977 -

pages 24 à 43

WILSON B.F.

ARCHER R.R.

Tree design : some biological solutions to mechanical problems.

Bioscience (Vol 29, N°5)

- 1979 -

pages 293 à 298

WILSON B.F.

The Development of Growth Strains and Stresses in Reaction Wood.

Chapitre 10 dans Xylem Cell Development (Ed. J.R. Barnett, Castle House Publications Ltd)

- 1981 -

20 pages

WILSON K.

WHITE D.J.B.

The anatomy of wood: its diversity and variability.

Editeur: Stobart & Son Ltd

- 1986 -

309 pages

YAMAMOTO

OKUYAMA T.

Analysis of the Generation Process of Growth stresses in cell walls.

Mokuzai Gakkaishi (vol.34)

-1988 -

pages 788 à 793

ZOBEL B.J.

VAN BUIJTEN J.P.

Wood variation. Its causes and control.

Springer Verlag - Springer series in wood science - Editor: E. TIMELL

- 1989 -

300 pages