

Table des matières

Introduction

Chapitre 1 : Schématisation de la structure "arbre" en théorie des poutres	1
1.1. Géométrie de l'arbre.....	1
1.1.1. Référentiel du tronc ($O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$).....	1
1.1.2. Ligne moyenne et repère de Frenet.....	2
1.1.2.1. Port des arbres.....	3
1.1.2.2. Architecture des arbres	4
1.1.2.3. Influence de facteurs écologiques et sylvicoles sur la forme du tronc de l'arbre	5
1.1.3. Section droite du fût.....	9
1.1.3.1. Repères associés et formes de la section droite	9
1.1.3.2. Singularités de la section droite à la base de la tige.....	11
1.1.4. Conclusions sur la géométrie des troncs	12
1.2. Efforts sur une section droite.....	12
1.2.1. Torseur des efforts intérieurs	12
1.2.2. Equations d'équilibre	14
1.3. Choix d'une loi de comportement, contraintes et déformations.....	15
1.3.1. Loi de comportement du matériau.....	16
1.3.1.1. Constitution du tronc.....	16
1.3.1.2. Diversités des comportements mécaniques.....	18
1.3.1.3. Influence de certains paramètres physiques.....	19
1.3.1.4. Hypothèses sur le matériau du tronc	22
1.3.2. Contraintes et déformations au niveau d'une section droite.....	23
1.3.2.1. Contrainte normale locale σ_{zz}	23
1.3.2.2. Contraintes de cisaillement locales σ_{xz}, σ_{yz}	24
1.3.2.3. Déformations associées.....	24
1.3.3. Déplacement de la section droite.....	25
1.4. Les conditions aux limites	26
1.4.1. L'extrémité aérienne	26
1.4.1.1. Référentiels intermédiaires.....	27
1.4.1.2. Détermination des efforts en $z=+L$	29
1.4.2. L'encastrement.....	30
1.5. Croissance et contraintes internes.....	32
1.5.1. Notion de géométrie évolutive.....	32
1.5.2. Notion de contraintes internes.....	32
1.5.2.1. Sécheresse et retrait au gel.....	32
1.5.2.2. Contraintes de croissance - réorientation et stabilité des tiges.....	33
1.6. Conclusion.....	36

Chapitre 2 : Essai de flexion statique sur un arbre forestier.....	37
2.1. Essai de flexion sur un tronc de cône élancé.....	38
2.1.1. Approximation géométrique.....	38
2.1.2. Le matériau.....	39
2.1.3. Efforts liés à l'essai de flexion statique.....	40
2.1.4. Déformations, déformée et flèche en $Z = L$	41
2.1.4.1 Déformations longitudinales et transverses	41
2.1.4.2 Déformations de cisaillement.....	45
2.1.5. Expressions de la déformée et de la flèche en $Z = L$	45
2.1.6. Rigidités locale et globale	48
2.1.6.1. Définitions.....	48
2.1.6.2. commentaires sur K et KI	49
2.1.7. Conclusion.....	51
2.2. Différents types d'encastrement.....	51
2.2.1. Modification du problème précédent.....	51
2.2.2. Nouvelle rigidité globale.....	52
2.2.3. commentaires.....	53
2.2.4. conclusion	55
2.3. Modélisation avec prise en compte du poids du houppier.....	55
2.3.1. Modification du problème précédent.....	56
2.3.2. Calcul de la flèche en tenant compte du poids	57
2.3.3. Expression des déformations	59
2.3.3.1 Déformations longitudinales et transverses	59
2.3.3.2. Déformations de cisaillement.....	61
2.3.4. nouvelles rigidités locale et globale prenant en compte le poids ..	61
2.4. Conclusion.....	65
 Chapitre 3 : Expérimentation en laboratoire et sur le terrain.....	 65
3.1. Présentation des arbres étudiés	65
3.2. Mesures dendrométriques.....	66
3.2.1. Mesures classiques	66
3.2.2. Mesures spécifiques.....	66
3.2.3. Exemple de relevés et commentaires sur les données dendrométriques	67
3.3. Application d'un chargement, mesure d'une flèche	70
3.3.1. Choix d'une gamme d'efforts et de la hauteur d'application.....	70
3.3.2. Déroulement de l'essai.....	71
3.3.3. Commentaires	72
3.3.4. Construction des courbes expérimentales-précision des mesures	72

3.4. Mesure de déformations locales en périphérie d'une section droite d'un tronc	73
3.4.1. Techniques de mesure des déformations	74
3.4.1.1. Extensomètre micromécanique.....	74
3.4.1.2. Utilisations des jauges électriques.....	75
3.4.2. Mesure préalable sur bois vert - extensométrie sur bois vert..	76
3.4.2.1. Le but.....	77
3.4.2.2. Flexion d'une poutre de bois vert.....	77
3.4.2.3. Compression d'un billon de bois vert.....	78
3.4.2.4. Comparaison des méthodes de mesure de déformations utilisées jauge et extensomètre.....	80
3.4.2.5. Précisions des résultats.....	83
3.4.2.6. Disposition du matériel.....	84
3.4.2.7. Conclusions.....	84
3.4.3. Protocoles de mesure de déformations locales sur des troncs d'arbres.....	84
3.4.3.1. Mesures avec jauges électriques.....	86
3.4.3.2. Mesures avec extensomètre mécanique.....	87
3.4.3.3. Construction des courbes expérimentales.....	87
3.5. Mesures de flèches sur éprouvettes de bois à l'état vert	88
3.5.1. Protocoles d'essais.....	89
3.5.1.1. flexion 3 points	90
3.5.1.2. flexion 4 points	91
3.5.2. Calculs des modules.....	91
3.5.3. Résultats sur les modules d'élasticité E_{L3} et E_{L4}	92
3.5.3.1. Comparaison des modules E_{L3} et E_{L4}	92
3.5.3.2. Commentaires sur les modules d'élasticité observés....	93
3.6. Mesures de l'infradensité et de l'humidité	94
3.6.1. Infradensité sur échantillon.....	94
3.6.1.1. Infradensité des éprouvettes	95
3.6.1.2. Liaison infradensité - module d'élasticité E_{L4}	95
3.6.2. Humidité sur échantillon et sur carotte de sondage.....	97
3.7. Conclusion.....	100
Chapitre 4 : Interprétations des résultats expérimentaux.....	101
4.1. Rigidités expérimentales et reproductibilité des essais.....	101
4.1.1. Allure des courbes expérimentales	101
4.1.2. Incertitudes sur les pentes des diagrammes expérimentaux....	103
4.1.3. Comportement linéaire.....	104
4.1.4. Comportement non linéaire	104
4.1.5. Reproductibilité de l'essai	
comportement élastique.....	106

4.1.5.1. Comparaison des rigidités globales et locales entre deux essais consécutifs, tous points confondus.....	106
4.1.5.2. Reproductibilité du comportement d'arbres accommodés préalablement.....	109
4.1.5.3. Reproductibilité du comportement d'arbres sans accommodation préalable.....	111
4.1.5.4. Influence de l'ordre des sollicitations sur les rigidités globales et locales.....	112
4.1.6. Conclusions.....	114
4.2. Rigidités globales de la structure.....	115
4.2.1. Première modélisation	
cône avec poids du houppier.....	115
4.2.2. Effet du poids du houppier.....	116
4.2.3. Variation de rigidité globale en fonction de l'orientation du moment imposé.....	118
4.2.3.1. Influence de singularités géométriques.....	119
4.2.3.2. Influence du matériau.....	120
4.2.4. Autres modélisations : poids du houppier négligé.....	121
poids du houppier négligé.....	121
4.2.4.1 rigidité globale du fût conique.....	121
4.2.4.2 Rigidité globale du fût cylindrique.....	122
4.2.4.3 Liaison entre les rigidités globales calculées à partir des différents modèles.....	123
4.2.5. Module d'élasticité obtenu à partir des rigidités globales expérimentales.....	124
4.2.6. Conclusion.....	126
4.3. Rigidité locale de la structure.....	126
4.3.1. Première modélisation	
cône et prise en compte du poids du houppier.....	126
4.3.2. Deuxième modélisation	
cône ou cylindre sans poids du houppier.....	127
4.3.3. Liaison entre la rigidité locale et le matériau.....	129
4.3.4. Calcul du module d'élasticité local à partir des rigidités locales observées.....	130
4.4. Autres méthodes d'estimation du module d'élasticité E_L dans l'arbre.....	132
4.5. Conclusion.....	133

Conclusion générale et perspectives.....134

Bibliographie

Liste des annexes

Annexes

Introduction

Les travaux de recherche rapportés ici, relèvent d'une thématique scientifique relativement jeune en France, la "Mécanique de l'arbre sur pied". Les résultats qui en découlent, constituent une contribution au programme "Qualité des Bois" de l'INRA et sont les fruits d'un travail exécuté en étroite collaboration entre la Station de Recherche sur la Qualité des Bois (SRQB), dirigée par G. NEPVEU, et l'équipe de Mécanique des Solides et des Structures du Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA) URA n°875 du CNRS, dirigée par le Professeur D. GUITARD.

L'une des finalités du programme "Qualité des Bois" de l'INRA est de définir les critères de qualification des aptitudes technologiques du matériau bois, dans l'arbre sur pied qui permettent une optimisation de l'adéquation, production - emploi des bois.

Cette problématique majeure est solution de continuité entre deux secteurs de la filière bois ; la sylviculture d'une part, les industries de transformation des bois d'autre part, dont la convergence d'intérêts n'est pas toujours bien perçue, en particulier dans notre pays. La "Qualité des Bois" est héritière de traditions, que les développements technologiques actuels impliquent de rénover, sinon de remettre en cause.

Autrefois, le matériau bois était massivement utilisé pour la confection d'éléments de structures mécaniques travaillantes. Les critères de choix des bois reposaient sur des spécificités reconnues à certaines essences (le bois d'if pour les arcs, le sapin pour les pieux, ...). En matière de charpentage pour l'habitat, ou en construction navale par exemple, un critère complémentaire d'appréciation de la "Qualité des Bois" fût celui de la forme des grumes, de la branchaison, de la disposition des verticilles. L'artisan voyait dans la géométrie brute de l'arbre, les ébauches préformées de pièces massives (Noël et Bocquet, 1987). Ces choix visaient à minimiser le façonnage des pièces, à réduire le nombre des liaisons et assemblages qui étaient peu favorables à une bonne tenue mécanique.

Si l'on s'accorde à reconnaître, encore de nos jours, que les luthiers conservent des critères de sélection empiriques de leur matière première, directement liées aux fonctions techniques des pièces entrant dans la facture des instruments (Epicéa de droit fil pour la confection des tables, Erables sycomores ondes pour les fonds et les éclisses), les travaux de recherches réalisés, en particulier au Japon (Ono et Norimoto, 1984 ;...), montrent qu'en ce domaine, l'introduction de critères objectifs de sélection des pièces de bois, contribue à un accroissement de productivité.

Les progrès technologiques qui ont été réalisés au cours des dernières décades, en matière de transformation du bois (sciage, tranchage, déroulage, déchiquetage, défibrage) mettent à la disposition du concepteur de matériaux nouveaux une grande variété de semi-produits (avivés, placages, déroulés, plaquettes, particules et fibres).

Les développements de colles, adhésifs et assemblages performants et de techniques aux procédés de préservation, ont ouverts en substitution à des domaines d'application devenus caduques, de larges débouchés que sont les composites à base de bois (lamellé-collés, contreplaqués, panneaux de particules, de fibres, composites bois-ciments, papiers).

Face à un développement considérable des échanges internationaux de bois matière première, chaque pays se trouve confronté au problème de la valorisation des essences indigènes. Les pays traditionnellement exportateurs de grumes se préoccupent d'une première transformation, induisant une valeur ajoutée avant exportation. Les pays traditionnellement importateurs sont confrontés à la valorisation optimales des ressources indigènes en vue de substitutions totales ou partielles des importations.

Ces quelques éléments, parmi d'autres, illustrent l'importance de maîtriser la "Qualité des Bois" en vue d'une adéquation de la ressource aux utilisations.

Concrètement, les objectifs "Qualité des Bois" peuvent se formuler de la façon suivante :

En supposant connus, d'une part un inventaire de la ressource et des potentialités de récolte (volumes disponibles par essence et par an à court, moyen et long terme), d'autre part les débouchés industriels de la matière ligneuse, en bois d'oeuvre, bois d'industrie, en utilisations potentielles nouvelles à court, moyen et long terme, il convient d'abord de parfaire les outils de qualification technologique de la ressource disponible, qui permettent en s'appuyant sur des critères de sélection pertinents, de dresser l'éventail hiérarchisé des emplois technologiques possibles du bois en provenance d'un peuplement donné.

Un second objectif, plus ambitieux, est de rechercher, si elles existent, les règles permettant en procédant à la qualification de peuplements jeunes, de prévoir les aptitudes technologiques des bois adultes, et d'apporter une contribution aux règles sylvicoles pour assurer la meilleure adéquation entre ressource possible à terme, et emploi probable.

Les travaux de recherche présentés, s'intègrent dans le programme "Développement architectural, apparition de bois de réaction et mécanique de l'arbre sur pied" qui vise à la compréhension des mécanismes de croissance de la structure arbre, et des conséquences sur la formation de la matière ligneuse. Plusieurs laboratoires aux compétences complémentaires, sont impliqués. Le Groupement Scientifique Mécanique et Rhéologie du bois y apporte un concours actif

en association avec des architectes de l'arbre du CIRAD, des anatomistes, sous la coordination scientifique de B. THIBAUT.

Dans ce contexte général, L'objectif de notre travail est de définir un essai non destructif, réalisé sur un arbre forestier, permettant de classer les individus par rapport à une caractéristique technologique non directement mesurable. Compte tenu du caractère nécessairement non destructif des essais à réaliser sur les arbres, le choix de la grandeur rhéologique de référence s'est porté sur une propriété élastique de préférence à une caractéristique de comportement aux états limites, telle qu'une charge de rupture. Le module d'élasticité longitudinale E_L , mesuré en flexion quatre points selon la norme (NF.B51-016) a été retenu.

Le mode de sollicitation imposé à la structure arbre est du type flexion simple. Les tests pratiques conduisent à la détermination expérimentale de deux rigidités apparentes, une rigidité globale de la structure qui prend en compte l'aptitude à la déformation de l'ensemble de la structure, et une rigidité locale, évaluée au niveau d'une section droite du fût, située à hauteur de poitrine.

En s'appuyant sur la théorie des poutres élastiques, et en prenant en compte les caractéristiques dendrométriques nécessaires à la caractérisation géométrique des fûts, nous nous proposons de montrer que de tels essais permettent un classement quantitatif des individus cohérent avec celui des modules d'élasticité E_L mesuré à posteriori, dans le bois de ces arbres. Ceci permettrait de fournir une méthode complémentaire, à la procédure "carotte de sondage" développée et utilisée par la Station de Recherche sur la Qualité des Bois.

Le premier chapitre est consacré à la description géométrique de la structure arbre ; le fût est considéré comme une poutre, éventuellement courbe, à section variable. Une attention particulière est portée au choix du référentiel de structure qui est positionné par rapport au repère terrestre. Ceci permet la prise en compte du poids de la structure dans le cas d'arbres inclinés ou fléchis. La partie haute du fût et le houppier, au-dessus du point d'application des efforts extérieurs n'est pris en compte que par le torseur des efforts équivalents dus au champ de pesanteur. Les conditions d'encastrement correspondant au complexe racinaire sont évoquées.

Le second chapitre présente les modélisations mécaniques de l'essai de flexion de l'arbre, dans le cadre de la théorie des poutres. La complexité maximale de schématisation prise en considération pour décrire la tige est une structure conique à sections droites elliptiques. Ce cas extrême est celui qui requiert le maximum de données géométriques sur l'arbre testé. Il englobe les modélisations plus simples telles que structure conique à section circulaire, et structure cylindrique circulaire ou elliptique qui pourraient s'avérer suffisantes

dans l'interprétation des résultats expérimentaux. Lorsqu'un arbre vertical est soumis à un essai de flexion, le centre de poussée du poids propre de l'arbre est déplacé. Le travail des forces de gravitation induit des effets de non linéarité de comportement qui sont pris en compte au niveau de ce chapitre, à toutes fins utiles.

Dans le chapitre trois est regroupé la description de l'ensemble des protocoles expérimentaux qu'il a été nécessaire de définir, lorsque ceux-ci ne relevaient pas de procédures normalisées. C'est en particulier le cas de certains relevés de caractéristiques dendrométriques spécifiques tel que profil des sections droites. Les expériences de qualifications physicomécaniques des bois, modules d'élasticité E_L , infradensité, taux d'humidité sont rapportées.

Le chapitre quatre rend compte d'une campagne d'essais réalisée sur un échantillonnage de 12 "peupliers", sélectionnés dans une population connue de la Station de Recherches sur la Qualité des Bois. Les résultats de mesures de rigidité globale et de rigidité locale font l'objet d'une analyse comparée. La pertinence des classements des individus est commentée par rapport au classement objectif adopté.

Chapitre 1

Schématisation de la structure arbre en théorie des poutres

La "théorie des poutres" (Laroze, 1980) permet de définir l'état mécanique d'une structure solide élancée sollicitée par des efforts extérieurs. Pour appliquer cette théorie à la structure "arbre forestier", une schématisation de la géométrie et des matériaux constitutifs doit être faite. Il en est de même pour les conditions aux limites et les sollicitations appliquées sur cette structure.

L'objet de ce premier chapitre est, tout en décrivant la structure complexe "arbre", de schématiser cette structure en vue de lui appliquer la théorie des poutres .

1.1. Géométrie de l'arbre

1.1.1. Référentiel du tronc $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$

Toutes les grandeurs géométriques sont définies par rapport à un repère orthonormé de référence, lié au tronc $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$. O est l'origine située au centre de surface de la section horizontale de base de l'arbre (situé au niveau du sol).

Les arbres forestiers sont des végétaux ligneux de grande taille qui ont une tige aérienne dressée. Le tronc, partie de la tige étudiée ici, indique de part sa tendance naturelle, un élancement suivant une direction donnée, cette direction peut être trouvée lorsque, situé à la base du tronc, on vise le bas du houppier tout comme le fait le bucheron avant d'abattre un arbre.

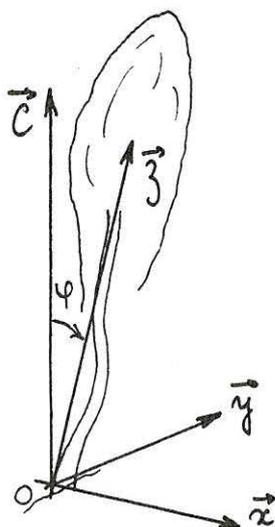


Figure 1.1 : Repère associé à un tronc d'arbre

On désigne par \vec{z} le vecteur de base suivant cette direction générale du tronc.

\vec{x} et \vec{y} sont définis dans le plan orthogonal à \vec{z} en référence à la verticale du lieu \vec{C} (opposé à la direction de la pesanteur), de telle sorte que \vec{x} soit la "direction d'inclinaison" de l'arbre :

On choisit \vec{y} dans le plan horizontal (c'est à dire sur la droite intersection du plan orthogonal à \vec{z} et du plan orthogonal à \vec{C}), orienté par la condition suivante : l'angle φ de la rotation autour de \vec{y} qui amène \vec{C} sur \vec{z} est positif (φ est compris entre 0 et $\frac{\pi}{2}$). \vec{x} défini par :

$\vec{x} \wedge \vec{y} = \vec{z}$, est alors orienté vers la direction où l'arbre penche.

1.1.2. Ligne moyenne et repère de Frenet

Un tronc d'arbre est décrit par le volume engendré par une surface plane (S) lorsque son centre de section décrit un arc de courbe G_0G_1 , la section (S) restant normale en G à cet arc . Au point G de coordonnées (x,y,z) et d'abscisse curviligne (s) de cet arc , on associe le repère mobile de Frenet $(G, \vec{t}, \vec{n}, \vec{b})$ où :

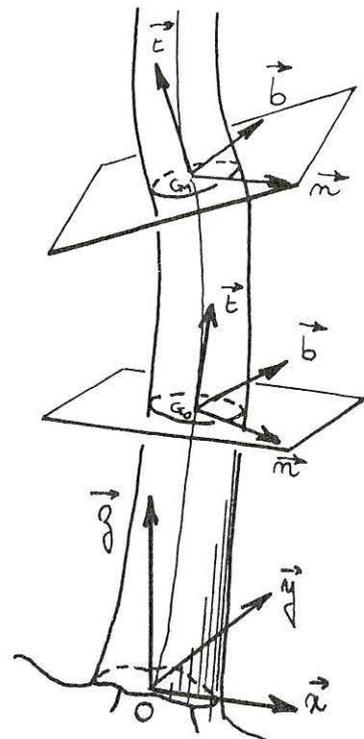
\vec{t} est un vecteur de base de la tangente à la ligne moyenne tel que :

$$\vec{t} = \frac{d\vec{OG}}{ds}$$

\vec{n} est une base de la normale en G : $\frac{\vec{n}}{R} = \frac{\partial \vec{t}}{\partial s}$

R est le rayon de courbure à l'abscisse s.

\vec{b} est tel que $\vec{t} \wedge \vec{n} = \vec{b}$



La détermination de $s, G, \vec{t}, \vec{n}, \vec{b}$ relève de l'analyse architecturale de l'arbre. (on notera qu'en toute section droite, G n'est pas assimilable a priori à la moëlle de la tige, cf § 1.1.3)

1.1.2.1. Port des arbres

L'arbre est un ensemble (système racinaire, tige, branches) dont la morphogenèse et les diverses fonctions (physiologiques, mécaniques) sont liées sans que l'on distingue les causes des effets.

Le développement de cette structure, est décrit par certaines lois générales ou modèles de croissance plus ou moins complexes qui tiennent compte de la botanique, de la physiologie et de l'écologie (station, climat, intervention de l'homme,...).

La silhouette de l'arbre, spécifique de l'espèce (ou de la variété) peut souvent aider à sa reconnaissance. Le port de l'arbre, qualifié de "champêtre" pour un individu isolé, est nommé "forestier" pour un arbre en situation de concurrence à l'intérieur d'un peuplement

Différentes théories ont été développées pour expliquer la forme des arbres, Larson en 1963 dans une synthèse bibliographique, cite parmi ces principales théories : la théorie nutritive (transformation de matière), la théorie hormonale (patrimoine génétique), la théorie mécanique.

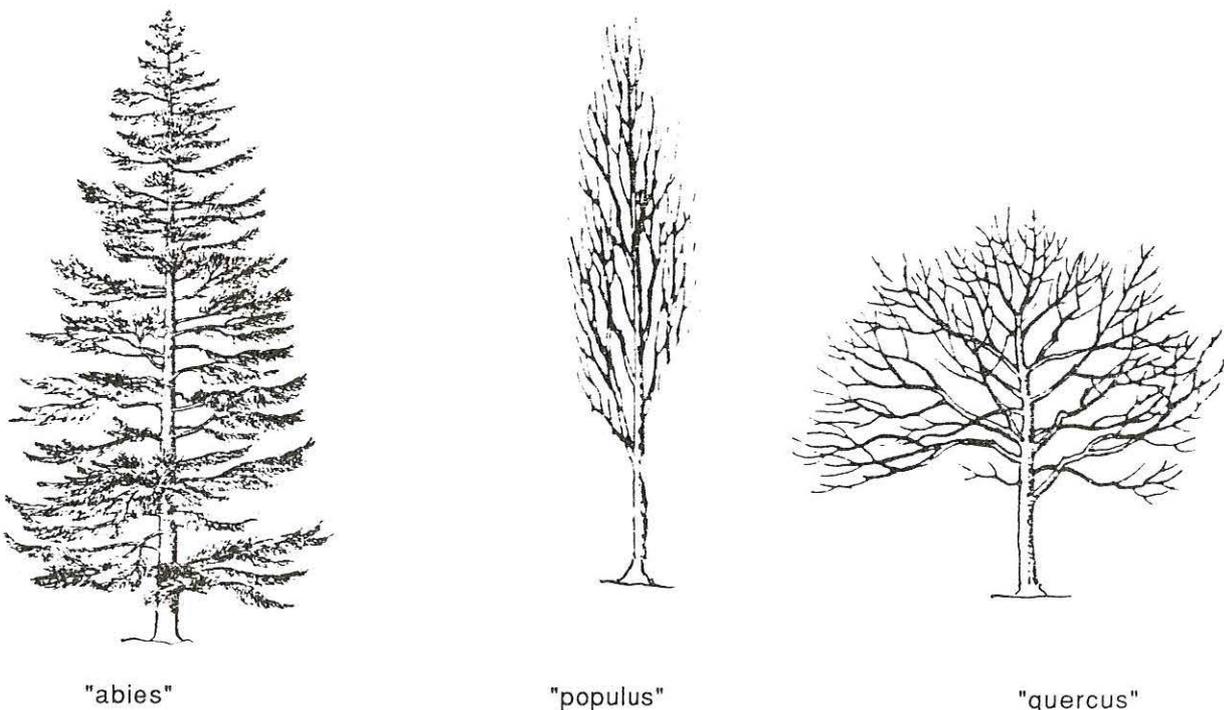


Figure 1.3 : Exemples de tiges et de ramifications (résineux et feuillus)

1.1.2.2. Architecture des arbres

Les spécialistes de l'architecture de l'arbre (Halle & al, 1978 ;...) ont montré, en s'appuyant plus particulièrement sur des travaux relatifs aux arbres tropicaux, qu'au cours de sa vie, un arbre se structure selon un modèle architectural défini à partir de l'activité des méristèmes.

Ce fonctionnement est caractérisé par trois phénomènes importants :

- la croissance, assurée soit par le bourgeon terminal pour donner des tiges monopodiale (peuplier, épicéa commun...), soit par les bourgeons terminal et axillaires pour créer des tiges sympodiales (tilleul, châtaignier...). Cette croissance peut être rythmique ou continue.

- la ramification, qui résulte des bourgeons axillaires est spécifique de chaque espèce. La prépondérance de la tige principale et des rameaux formés le plus près du bourgeon terminal (développement acrotone) permet la constitution du tronc et une ramification régulière. Sur les rameaux obliques, la prépondérance des bourgeons axillaires situés sur la face inférieure (développement hypotone) ou sur les faces latérales (développement amphotone) des tiges contribue à l'étalement des branches ou ramures.

- la mortalité, qui affecte les méristèmes. Lorsque sur une branche, tous les bourgeons sont morts, celle-ci se dessèche puis parfois tombe ; cet élagage naturel permet l'apparition du tronc et de branches sèches.

L'intégration du facteur temps dans les processus de croissance, ramification et mort, permet la modélisation de l'architecture d'un arbre (ou d'une plante).

Ces modèles sont élaborés à partir :

- de nombreuses données dendrométriques spécifiques (longueurs de branches, d'entre noeud, angle des branches avec la tige principale...),

- d'histogrammes de fréquence et d'approximations par des modèles de présence ou non, de bourgeons et de fleurs,

- de calculs des paramètres architecturaux réalisés sur les modèles de croissance (ramification, mortalité et rythme).

L'architecture de l'arbre modélise la structure d'un point de vue "organisationnel" et "fonctionnel" ; l'arbre est un ensemble de branches et de nœuds attachés à un axe commun, la tige. En négligeant la croissance radiale (ou secondaire), la nature du bois du tronc et des branches est quasiment ignoré, dans l'état actuel des travaux.

Cependant ces modèles qui permettent déjà, grâce à des moyens informatiques adaptés (C.A.O., D.A.O), de reconstituer l'évolution spatiale de certaines espèces, isolées, près d'un obstacle (mur...) ou en peuplement, semblent prometteurs quant aux utilisations que l'on peut en faire (prévision de production, interaction spatiale des arbres...). Toutefois, bien que les modèles actuels, rendent compte de la silhouette de l'arbre, ils n'expliquent pas les modifications de forme liées à des conditions écologiques ou des pratiques sylvicoles particulières.

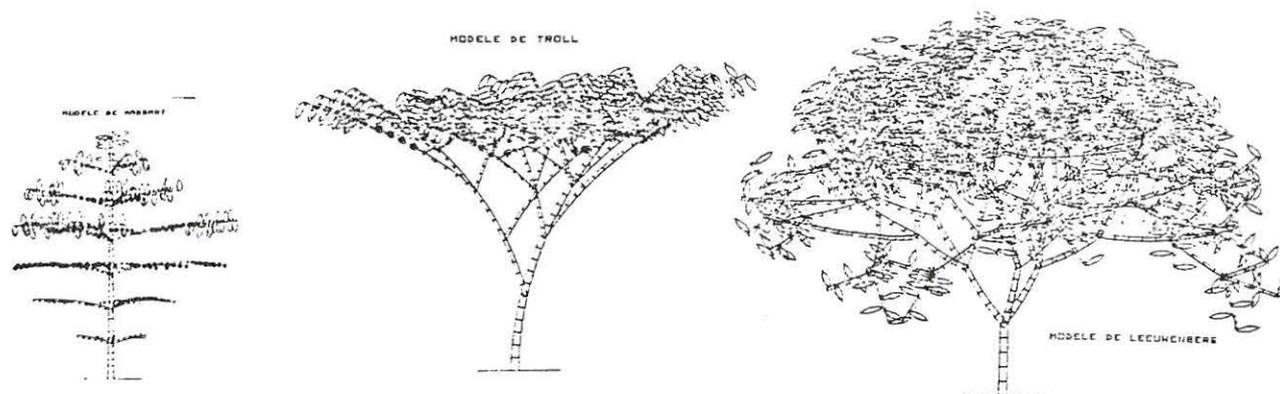


Figure 1.4 : Différents modèles d'architectures d'arbres (d'après De Reffye, 1977)

1.1.2.3. Influence de facteurs écologiques et sylvicoles sur la forme du tronc de l'arbre

Des paramètres écologiques, les conditions atmosphériques (vents, neige, glace, lumière...) sont ceux qui influencent le plus la forme des troncs d'arbres.

Les vents occasionnels ou permanents affectent la vie de l'arbre depuis la germination jusqu'à la mort. Ils influencent la croissance radiale des tiges et modifient l'anatomie du bois produit avec la formation de bois de réaction ; une abondante littérature traite de la présence de bois de réaction sur des tiges exposées aux vents.

Jacobs (1939 et 1954) montre dans une série d'expériences l'influence du vent sur la croissance radiale de deux essences (*Pinus radiata* et *Eucalyptus* sp.) à partir d'arbres témoins, libres de leurs mouvements et d'arbres constamment attachés par des câbles. Outre la croissance excentrique et les différences de largeur de cernes à la base et au dessus du point d'attache, les arbres attachés ont des cernes à la base moins larges, une excentricité de la moëlle moins marquée que les

arbres témoins. Autre résultat important, les arbres libérés après deux années, perdaient leur stabilité au vent. Ces arbres s'étaient "accoutumés" à leur support câblé en produisant du bois (dans la partie immobile) comme s'il n'y avait pas de vent, alors que la partie au dessus du point d'attache élaborait un matériau avec bois de réaction. Larson (1965) a confirmé ces résultats sur des Mélézes (*Larix laricina*.)

La forme des houppiers, parfois modelée par le vent, se répercute sur la forme des tiges comme on peut l'observer, par exemple, sur certains arbres situés en zone venteuse (bord de mer, régions d'altitude). Dans ces exemples, l'évolution de la géométrie de l'arbre se fait sur une longue durée.

Ces situations se distinguent de celles où par suite d'un "coup de vent", vent subit et violent, l'arbre réagit de différentes façons :

- les tissus ligneux peuvent se rompre localement (arrachement des fibres), de façon peu ou pas visible de l'extérieur, tout au moins juste après l'événement ; en effet des bourrelets de "cicatrisation" se forment et apparaissent de façon caractéristiques sur la tige. Ce scénario est visible par exemple chez le "Peuplier" où les blessures occasionnées sont favorables à l'entrée d'agents pathogènes qui fragilisent la tige.
- il peut y avoir une courbure prononcée mais sans rupture de la tige. Ce dernier scénario va favoriser le développement des bourgeons situés sur l'extrado de la tige et donner des tiges aux formes particulières.
- enfin, l'arbre peut se déraciner (châblis) ou bien la tige peut se rompre à une hauteur quelconque (volis).

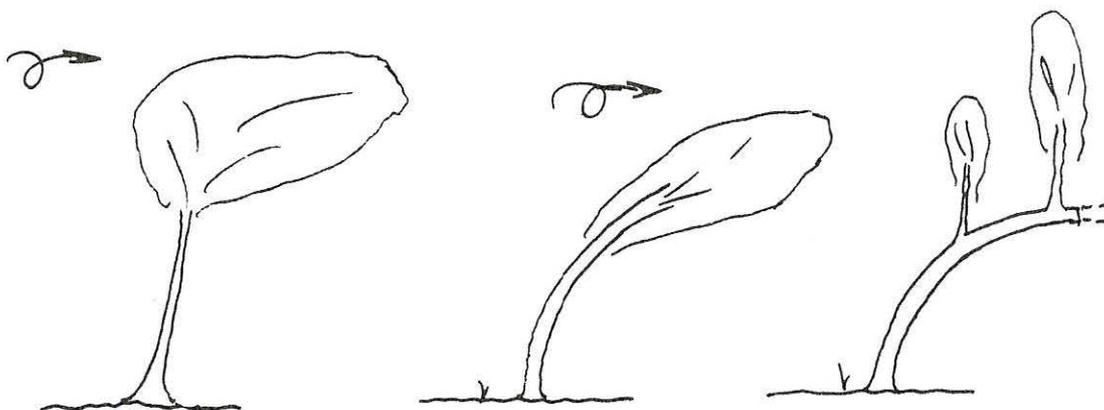


Figure 1.5 : Différentes formes d'arbres déformés par le vent

Différents auteurs (Lenz,1967;...) signalent l'action mécanique des couches successives de neige sur la tige de jeunes arbres, qui se

redressent à la fonte des neiges. Ces actions répétées sur la tige, entraînent une courbure de la tige à partir de l'empatement ; à ce niveau de la tige, une section donnée présente fréquemment du bois de réaction.



Figure 1.6 : Tiges déformées par la neige (d'après Lenz, 1967)

A ces deux exemples de facteurs climatiques qui peuvent modeler la forme de l'arbre, il faut ajouter différents tropismes (phototropisme, géotropisme...). Parmi les tropismes qui sont des réactions de l'arbre (ou d'une plante) à une "singularité" de leur environnement proche, le phototropisme est certainement celui dont la conséquence est la plus marquante. Dans un milieu éclairé uniformément, la croissance de la tige et des rameaux se fait sans courbure particulière. En revanche, avec un éclairage plus marqué latéralement, les branches se développent préférentiellement du côté éclairé, et la forme de la tige s'en trouve affectée.

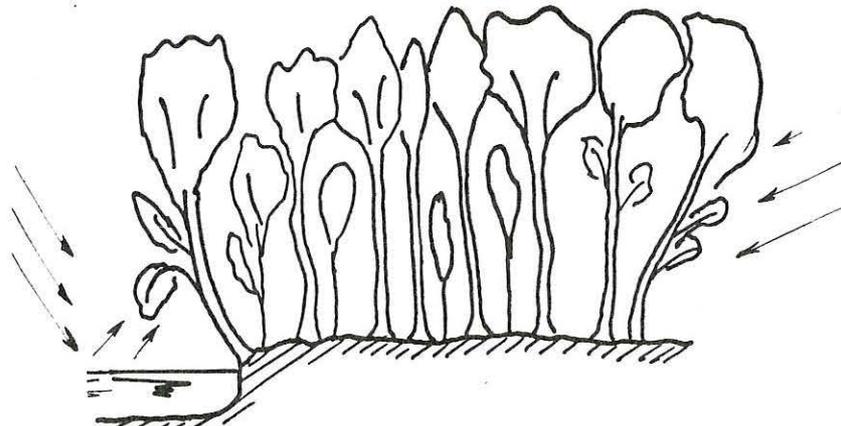


Figure 1.7 : Illustration du phénomène de phototropisme

Ce phénomène peut s'observer sur des arbres de lisière qui ont des branches plus développées latéralement, sur des arbres situés à proximité d'un obstacle naturel ou artificiel.

D'une façon générale, les feuillus sont capables de mouvements phototropiques plus importants que les résineux. La réaction est d'autant plus marquée, chez les uns ou les autres, selon le caractère héliophile (cas des peupliers) ou sciaphile (cas du sapin) de l'essence.

L'homme à travers ses différentes interventions sylvicoles (espacement des plantations, types d'éclaircie, élagage), influence la forme des fûts en conditionnant la taille et la position du houppier sur la tige.

Chez les arbres dominants, la croissance en hauteur, qui se fait suivant un modèle illustré sur la figure 1.8 est quasiment non affectée par le traitement sylvicole mais plutôt par les conditions de station. Ce n'est pas le cas de la croissance diamétrale qui est liée au développement du houppier.

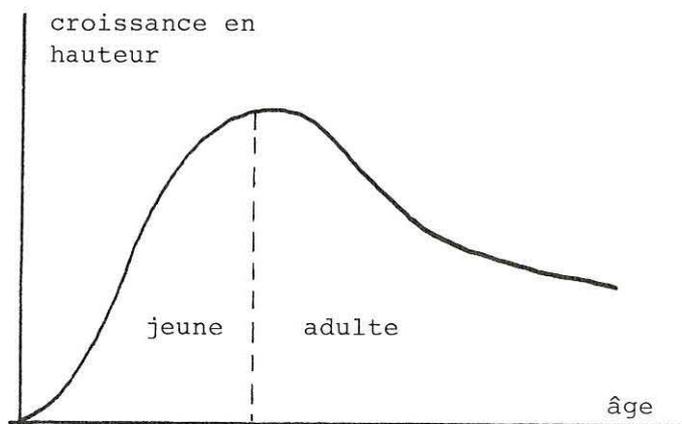


Figure 1.8 : Modèle de croissance en hauteur d'un arbre

A l'état isolé, l'arbre présente sa forme spécifique, il n'en est pas de même dans les peuplements relativement dense où, en concurrence avec ses voisins qui interceptent une partie de la lumière, l'arbre perd par élagage naturel ses branches latérales, acquérant un fût long, une cime peu développée. Ce type d'arbre se rencontre dans les peuplements de futaie. Le traitement sylvicole que doit appliquer le forestier le met face à un compromis ; cultiver un peuplement relativement serré pour obtenir des arbres élancés avec des houppiers étroits ou entretenir des arbres plus espacés mais au risque de favoriser le développement latéral du houppier et des branches libres et produire ainsi des fûts plus coniques avec présence de singularités (inclinaison du fil, gros nœuds). L'élagage artificiel pratiqué en suivant quelques règles (nombre de tiges/ha, hauteur d'élagage,...) permet d'éviter ces inconvénients, tout en améliorant la cylindricité des troncs (Polge, 1969 ; Keller,1979).

commentaire

A un instant de la vie de l'arbre, la géométrie du fût résulte d'éléments naturels ou artificiels dont il faut apprécier l'état. L'analyse géométrique nécessaire, porte sur la section du tronc et plus particulièrement, son allure, son inertie et l'évolution de ces caractéristiques avec la hauteur. Cette analyse géométrique, ne tient pas en compte les formes que le tronc pouvait avoir à une période antérieure.

1.1.3. Section droite du fût

1.1.3.1. Repères associés et formes de la section droite

Soit (S) la section droite rapportée aux axes $G\vec{n}$ et $G\vec{b}$ (cf. figure 1.9)

Le repère principal central d'inertie $(G, \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$ est lié à la section droite, ce repère est défini par : $\vec{Z} = \vec{t}$

\vec{X} et \vec{Y} sont les bases des axes principaux d'inertie de la section (S).

Le changement de repère $(G, \vec{t}, \vec{n}, \vec{b}) \rightarrow (G, \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$ se fait par une rotation d'angle ω autour de l'axe \vec{t} .

On définit les moments quadratiques suivants :

$$I_X = \iint_{(S)} Y^2 dS \quad I_Y = \iint_{(S)} X^2 dS$$

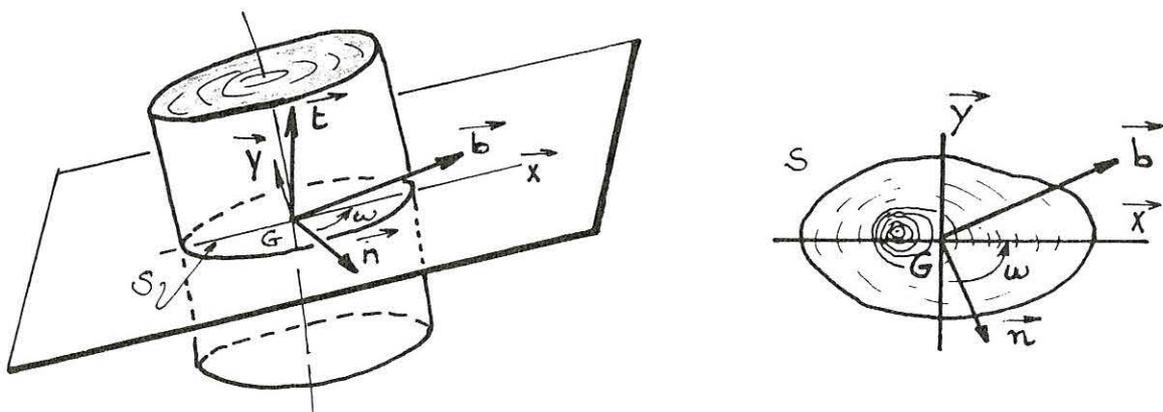


Figure 1.9 : Repères associés à une section

La forme de la section résulte de la croissance diamétrale des arbres qui est liée à l'activité de l'assise génératrice libéro-ligneuse produisant du xylème (ou bois) vers l'intérieur et du liber (écorce interne) vers l'extérieur.

Au niveau d'une section droite d'un tronc, cette activité se traduit par la présence de couches concentriques ou non, autour d'une moëlle. D'une façon générale, en toute section, le point G ne se confond pas avec la position de la moëlle (cf. figure 1.10).



+ position approximative de G

Figure 1.10 : Différentes formes de sections

La dimension diamétrale de la section est couramment mesurée par le forestier à une hauteur dite "hauteur d'homme ou de poitrine" (1.30m) : En effet, le cubage des arbres ou des grumes demande une mesure de l'aire de la section, aire estimée par un diamètre (d_f) ou une circonférence (c) définis par le forestier de la façon suivante :

La circonférence (c) est la longueur d'un ruban circonscrit au tracé de la section. Le diamètre (d_f) est un diamètre de la section, relevé à l'aide d'un compas forestier, suivant une direction généralement quelconque.

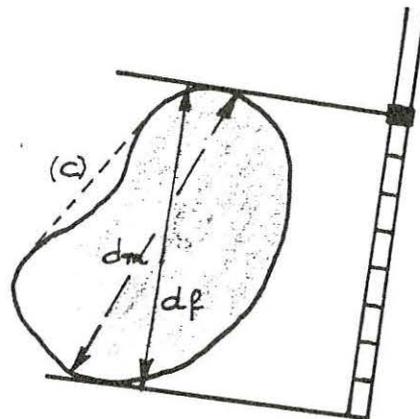


Figure 1.11 : Diamètres et circonférence d'une section

Le mécanicien définit le diamètre (d_m) d'une section comme la plus grande distance séparant deux points de la surface considérée (Laroze, op.cit.).

L'évolution du diamètre (donc de l'aire de la section) avec la hauteur (fig.1.12-a) est quantifiée par les forestiers par la notion de défilement ou coefficient de décroissance. Plusieurs coefficients sont utilisés (Pardé, 1988), nous retiendrons celui défini comme le rapport du diamètre à mi-hauteur de l'arbre par le diamètre relevé à hauteur d'homme.

La figure 1.12 met en évidence l'évolution du profil d'une tige de "Peuplier" au cours des années successives, reconstituée par analyse de tige. Sur la forme finale, différentes zones apparaissent en fonction de la hauteur ; on trouve une partie évasée (0-2m) liée à la continuité de l'enracinement à la base de la tige. Elle est suivie par une zone (2-10) où la décroissance du rayon est régulière, partie qui représente le fût sans branche. Enfin au delà de 10 mètres, la présence de branches sur la tige, modifie la décroissance radiale de celle-ci.

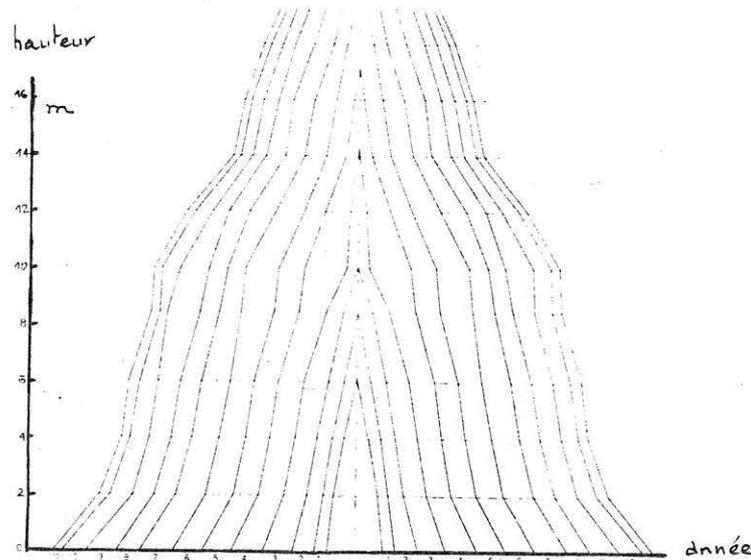


Figure 1.12: Exemples d'évolution du profil d'une tige au cours des années successives (d'après Giordano, 1971)

1.1.3.2. Singularités de la section droite à la base de la tige

Le prolongement du tronc par les racines s'illustre parfois, par la présence de contreforts de dimensions plus ou moins grandes comme chez certaines essences tropicales. La section du tronc, au niveau de l'empattement, prend alors des formes géométriques complexes.

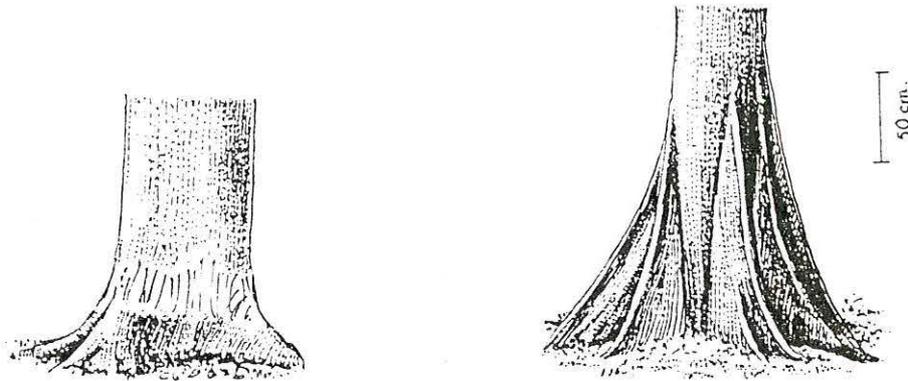


Figure 1.13 : Exemples de contrefort (d'après Letouzet, 1972)

1.1.4. Conclusions sur la géométrie des troncs

L'analyse géométrique des tiges ou des troncs relève de la dendrométrie. Les mesures de diamètres pour des hauteurs de 1,30 mètre font partie des relevés traditionnels pour le forestier. Toutefois, pour mener à bien l'étude géométrique du tronc d'autres grandeurs dendrométriques sont nécessaires : diamètres de section du tronc (sous écorce cf §1.3.1.1) située à hauteur d'homme, coefficient de décroissance et profil du fût . Connaissant la géométrie du tronc, on peut faire le bilan des efforts et des moments qui s'appliquent sur cette géométrie.

1.2. Efforts sur une section droite

1.2.1. Tenseur des efforts intérieurs

La mécanique des solides caractérise les efforts intérieurs, par le tenseur local des contraintes $\overleftrightarrow{\sigma}$ défini en tout point du solide. En théorie des poutres, tenant compte d'une dimension grande par rapport aux deux autres, il est nécessaire d'exprimer le tenseur des efforts intérieurs au centre de surface de la section droite considérée.

Considérons une section droite (S) et un élément de surface (dS) centré en P, d'orientation normale \vec{m} , sur laquelle s'applique le vecteur contrainte $\vec{\sigma}(P, \vec{m})$:

$$\vec{\sigma}(P, \vec{m}) = \overleftrightarrow{\sigma}(P) \cdot \vec{m}$$

Si $\vec{m} = \vec{t}$ alors dans le référentiel $(G, \vec{t}, \vec{n}, \vec{b})$, le vecteur contrainte a pour composantes :

$$\vec{\sigma}(P, \vec{m}) = \begin{pmatrix} \sigma_{tt} \\ \sigma_{nt} \\ \sigma_{bt} \end{pmatrix}$$

Le torseur des efforts sur la surface (S) admet :

- une résultante : $\vec{R} = \int_S \vec{\sigma}(P, \vec{t}) dS$
- un moment résultant : $\vec{M} = \int_S \vec{GP} \wedge \vec{\sigma}(P, \vec{t}) dS$.

La résultante \vec{R} se décompose en un effort normal et en efforts tranchants

- l'effort normal est la projection de \vec{R} sur l'axe de la normale à la section (S)

$$N = \vec{R} \cdot \vec{t} = \int_S \sigma_{tt} dS$$

- les efforts tranchants \vec{T}_n et \vec{T}_b sont les projections de \vec{R} sur le plan de la section (S)

$$T_n = \vec{R} \cdot \vec{n} = \int_S \sigma_{nt} dS \quad \text{et} \quad T_b = \vec{R} \cdot \vec{b} = \int_S \sigma_{bt} dS$$

Le moment résultant \vec{M} s'écrit comme la somme d'un moment fléchissant et d'un moment de torsion.

- le moment de torsion M_t est la projection de \vec{M} sur l'axe de la normale à la section :

$$M_t = \vec{M} \cdot \vec{t} = \int_S (\beta \sigma_{bt} - \gamma \sigma_{nt}) dS, \text{ où } \beta \text{ et } \gamma \text{ représentent les coordonnées}$$

d'un point P de (S) dans le repère (G, \vec{n}, \vec{b})

- les moments fléchissants M_n et M_b sont les projections de \vec{M} sur le plan de la section (S)

$$M_n = \vec{M} \cdot \vec{n} = \int_S \gamma \sigma_{tt} dS \quad \text{et} \quad M_b = \vec{M} \cdot \vec{b} = \int_S -\beta \sigma_{tt} dS$$

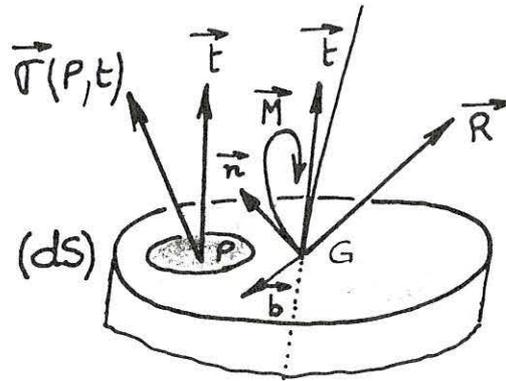


Figure 1.14: Efforts et moments sur une section droite

Remarque :

Les composantes du torseur des efforts intérieurs écrites dans un repère $(G, \vec{t}, \vec{n}, \vec{b})$ lié à la section, peuvent s'écrire dans le repère principal d'inertie $(G, \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$ en utilisant la rotation autour de $\vec{Z} = \vec{t}$ pour le passage d'un repère à un autre.

1.2.2. Equations d'équilibre

Soit un tronçon de poutre de longueur ds , associé au repère mobile $(G, \vec{t}, \vec{n}, \vec{b})$, limité par les sections S_0 de centre $G_0(s)$ et (S_1) de centre $G_1(s+ds)$. L'élément de tronc considéré est en équilibre si la résultante des efforts et la résultante des moments sont nulles.

$$\frac{d\vec{R}}{ds} + \vec{P} = \vec{0} \quad \frac{d\vec{M}}{ds} + \vec{t} \wedge \vec{R} + \vec{I} = \vec{0}$$

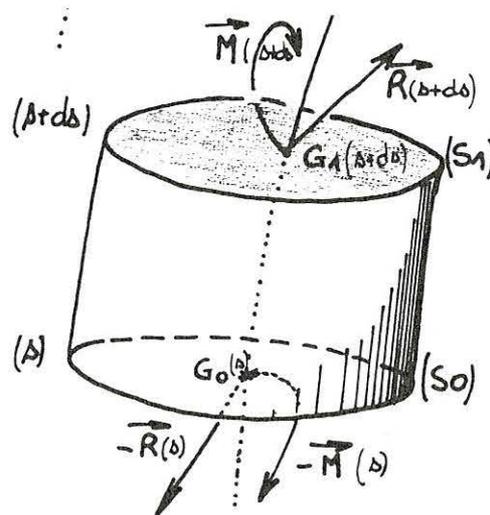


Figure 1.15: Tronçon de poutre en équilibre

A partir de ce principe, les équations d'équilibres sont :
pour les efforts :

$$\frac{dN}{ds} - \frac{T_n}{R_c} + p_t = 0$$

$$\frac{N}{R_c} + \frac{dT_n}{ds} - T_b + p_n = 0$$

$$\frac{T_n}{R_t} + \frac{dT_b}{ds} + p_b = 0$$

pour les moments :

$$\frac{dM_t}{ds} - \frac{M_n}{R_c} + l_t = 0$$

$$\frac{M_t}{R_c} + \frac{dM_n}{ds} - \frac{M_b}{R_t} - T_b + l_n = 0$$

$$\frac{M_n}{R_t} + \frac{dM_b}{ds} + T_n + l_b = 0$$

où : $\vec{R} = N \vec{t} + T_n \vec{n} + T_b \vec{b}$; résultante des efforts

$\vec{M} = M_t \vec{t} + M_n \vec{n} + M_b \vec{b}$; moment résultant

$\vec{p} = p_t \vec{t} + p_n \vec{n} + p_b \vec{b}$; densité linéique des efforts extérieurs

$\vec{m} = m_t \vec{t} + m_n \vec{n} + m_b \vec{b}$; densité linéique des moments extérieurs

$\frac{1}{R_c}$ et $\frac{1}{R_t}$ représentent respectivement la courbure et la torsion de la ligne moyenne au point G.

Le torseur des efforts intérieurs est donc complètement défini par des conditions aux extrémités de la poutre, qui seront discutées au paragraphe 1.4. Ces efforts intérieurs se superposent à un état d'équilibre initial de contraintes internes existantes au sein du fût (cf. §1.5.2)

Dans la suite de l'étude, \vec{p} et \vec{m} n'interviendront pas en tant que densité linéique des efforts et des moments extérieurs. Toutefois, le poids propre de la structure sera représenté par sa résultante, appliquée à une certaine cote ($Z=L+H$).

1.3. Choix d'une loi de comportement, contraintes et déformations

Le comportement du matériau bois est essentiellement étudié sur des produits obtenus après transformation industrielle et dans une moindre mesure lors de son usinage (sciage, rabotage,...); En revanche, le comportement du bois dans l'arbre ou bien à l'état "vert" est très peu connu et seul, certains spécialistes de l'usinage de bois vert (Thibaut(1988);...) étudient son comportement sous des sollicitations particulières (déroulage).

L'étude du comportement mécanique du bois du tronc, nécessite le choix d'une loi de comportement qui approche au mieux les réalités de la structure.

1.3.1. Loi de comportement du matériau

1.3.1.1. Constitution du tronc

Le tronc des arbres est constitué essentiellement de bois et d'écorce résultant de l'activité respective des assises cambiale et subéro-phello-dermique. Chaque élément constitutif se trouve en proportion variable suivant les espèces, celle du bois étant la plus importante. En effet le volume de bois représente de 60 à 95% du volume total de la grume (Giordano,1971).

Dans ce qui suit, les tissus extérieurs à l'assise cambiale, comme le liber et le liège formant l'écorce, sont assimilés à un matériau très souple qui ne supporte pas les efforts de la structure ; on s'intéresse donc ici au matériau bois seul.

L'activité cambiale rythmique ou continue liée au patrimoine génétique de l'individu et aux conditions écologiques dans lesquelles évolue l'arbre à savoir des conditions édaphiques (nature du sol, rétention en eau ...) atmosphérique (température(s), hygrométrie, vent, neige...) et sociale (position vis à vis d'éventuels voisins se traduit au niveau d'une section droite d'un tronc par une hétérogénéité à différentes échelles.

A une échelle d'observation macroscopique, l'élément de surface dS considéré est suffisamment grand devant la structure cellulaire du bois, une trachéide mesure de 0.5 à 10 millimètres de long et une fibre environ 1.5 à 2 millimètres.

Le matériau bois est donc supposé continu.

Les cernes annuels, visibles sur bon nombre d'essences tempérées, constitués de zones plus ou moins contrastées de bois initial et de bois final, contribuent à une hétérogénéité entre cernes. On distingue les bois hétérogènes (chênes...) des bois homogènes (peupliers...)

Dans cette tige multicouche fabriquée naturellement, on distingue également, le bois formé pendant les premières années de la vie de la tige, le bois juvénile, du bois élaboré plus tard, le bois adulte. La transition entre les deux n'est pas nette mais progressive, elle s'accompagne de variation radiale de certains paramètres de structure tels que : largeur de cernes, longueur de fibres ou de trachéides, angle des microfibrilles,...

Un autre phénomène, qui s'ajoute aux précédents, rend compte de la complexité de la structure arbre et de son élaboration. Il s'agit du bois de réaction (bois de compression chez les Gymnospermes et bois de tension chez les Angiospermes). Une littérature abondante (Timell,1987) traite de l'origine et des diverses caractéristiques (anatomique, physique,...) de ces bois dont la localisation dans la tige et les branches ne s'explique pas toujours facilement.

Au niveau d'une section (fig1.16) où il y a du bois de réaction, on distingue également d'autres zones (bois opposé et bois normal) ou certaines propriétés du bois (masse volumique,...) peuvent varier.

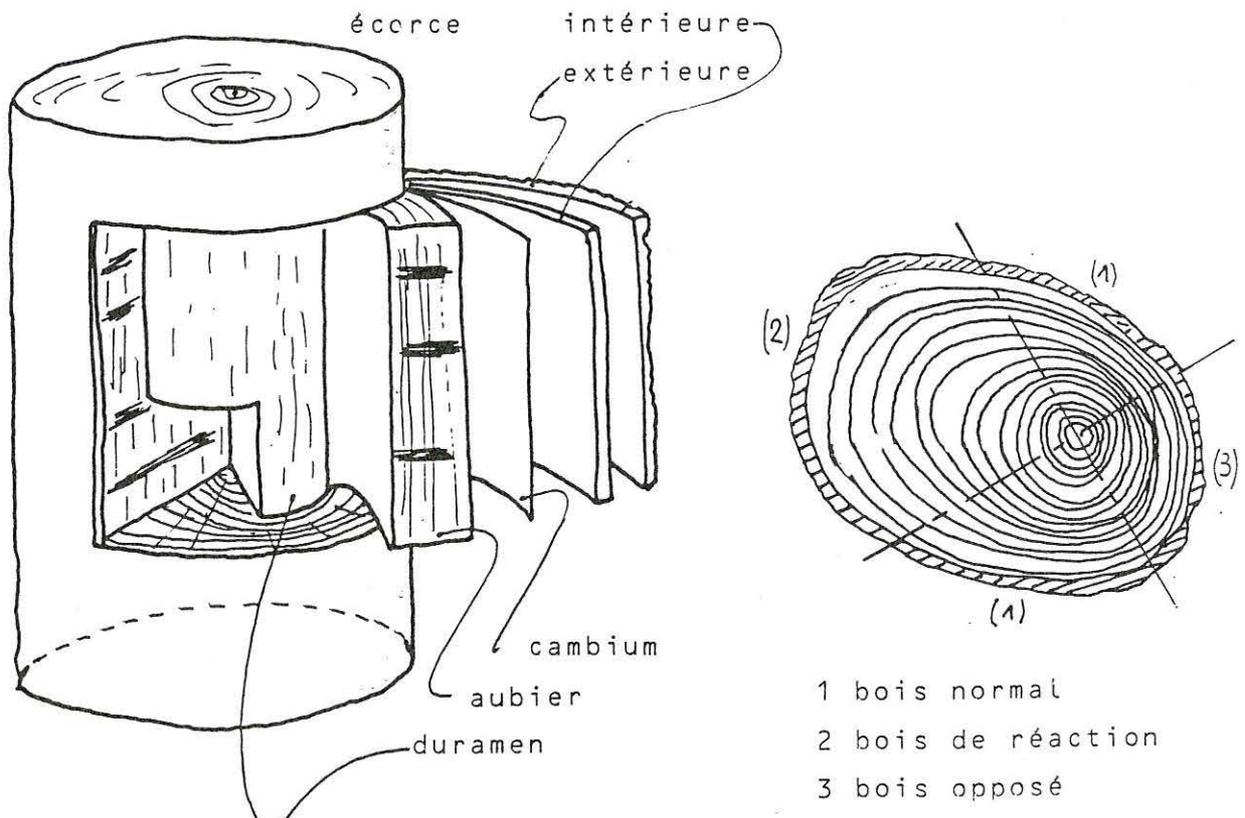


Figure 1.16 : Coupe d'un tronc d'arbre et zones sur une section

Enfin, comme sur tout être vivant, le temps apporte des modifications progressives sur les anciennes cellules, mort, obstruction, coloration ; cette dernière n'est qu'une éventualité. Ces phénomènes, appelés duraminisation, permettent de distinguer chez certaines essences le duramen de l'aubier de par l'aspect ou les caractéristiques du bois.

1.3.1.2. Diversités des comportements mécaniques

Le matériau bois possède une anisotropie de formation qui est principalement une anisotropie de révolution avec des singularités liées à la présence de branches, nœuds,.... Compte tenu de la structure particulière du tronc d'arbre, un référentiel de structure $(\vec{R}, \vec{T}, \vec{L})$ est défini en un point quelconque, à partir des trois directions d'anisotropie R : radial, T : tangentiel, L : longitudinal.

Tahani (1988) présente sur un volume élémentaire de bois un repère de symétrie matérielle local $(\vec{r}, \vec{t}, \vec{l})$ (r : radial, t : tangentiel, l : longitudinal) dans lequel le comportement élastique du bois est caractérisé par le tenseur des complaisances élastiques \overleftrightarrow{S} , qui lie l'état de déformation linéarisé (ϵ) à l'état de contrainte (σ). Dans un référentiel de structure lié à la grume $(\vec{R}, \vec{T}, \vec{L})$, la loi de comportement du matériau orthotrope, s'écrit dans ce référentiel après un changement de base, à partir de trois rotations. De nombreux auteurs ont travaillé sur l'identification des 9 constantes élastiques du tenseur \overleftrightarrow{S} dans le repère de symétrie matérielle (Seichepine, 1980 ; Bucur et al., 1984)

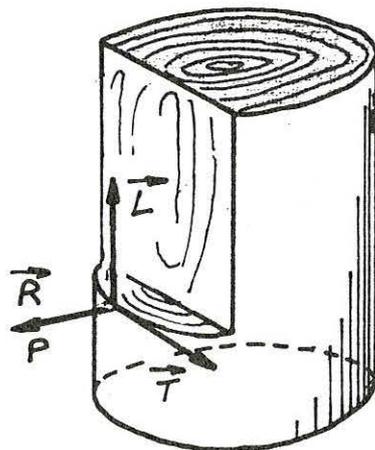


Figure 1.17 : Repère d'orthotropie du matériau bois

Outre l'anisotropie du matériau bois, le mécanicien considère également ce matériau, comme un composite constitué essentiellement de

polymères complexes (celluloses, lignines, hémicelluloses, tanins, résines) ; les proportions de chaque constituant est variable suivant les espèces et les conditions de développement.

Ces différents polymères sensibles à l'humidité et à la température, confèrent au bois, un comportement viscoélastique largement discuté dans la littérature, car il pose des problèmes originaux de caractérisation et de modélisation (Gènevaux,1988 ; ...)

1.3.1.3. Influence de certains paramètres physiques

Masse volumique, infradensité

Parmi les paramètres essentiels qui agissent sur les caractéristiques du matériau, on trouve la masse volumique , grandeur qui indique dans un volume donné la quantité de matière existante. Usuellement, on préfère utiliser l'infradensité qui est définie comme la masse de l'échantillon anhydre rapportée à son volume saturé d'eau.

Une littérature abondante traite des liens de cette infradensité ou de la masse volumique avec les caractéristiques physiques du matériau (rétractibilité, propriétés mécaniques...) ; par exemple, elle est corrélée positivement aux modules d'élasticités longitudinaux (De Reboul,1988 ;...) et charges de rupture .

Au sein d'un tronc, l'hétérogénéité de formation du bois se traduit par une variabilité de densité relativement importante. Cette variabilité est liée au plan ligneux (bois hétérogènes-bois homogènes) à la présence de bois juvénile et adulte, aux différences bois initial-bois final et éventuellement de bois de compression ou de tension.

Lenz (1956) met en évidence chez différents "peupliers", les variations radiales de densité anhydre et l'évolution de cette dernière en fonction de la hauteur (figure 1.18); au sein d'une même espèce, les variations radiale et en hauteur de la densité anhydre suivent des lois différentes. Chez le "peuplier noir", la densité anhydre diminue radialement du cœur vers l'écorce alors que chez le "peuplier blanc" ceci n'est valable qu'au delà d'une certaine hauteur ; sur la partie inférieure de la tige la densité anhydre augmente du cœur vers l'écorce. La densité du bois juvénile différente du bois adulte, explique en partie ces variations ; la présence sur l'un des côtés des tiges, de bois de réaction, plus dense que le bois normal, explique la différence observée entre nord et sud .

Enfin, diverses publications (Nepveu et al. 1984;...) signalent la variabilité clonale de l'infradensité du bois des "peupliers", permettant

ainsi au sélectionneur d'améliorer sensiblement la densité du bois des clones.

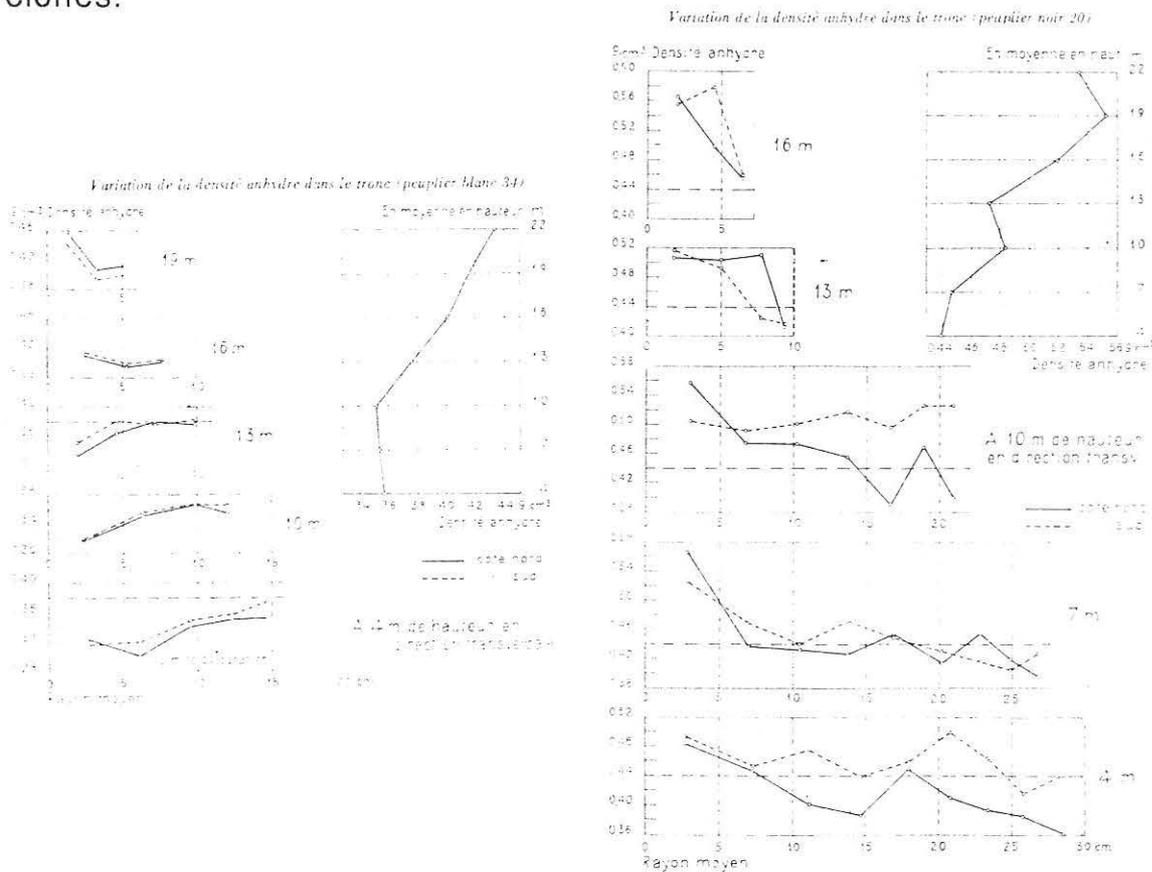


Figure 1.18 : Variation de la densité anhydre dans le tronc (d'après Lenz-1956)

Humidité

Le matériau bois présente un caractère hygroscopique. Le taux d'humidité (H%) est défini comme le rapport entre la masse d'eau présente dans un volume de bois donné et la masse de matière ligneuse anhydre (M_0) de ce même volume ; M_0 de l'échantillon, est obtenue après 24 heures d'étuve à 102°C

$$H\% = 100 \frac{M_H - M_0}{M_0}$$

La quantité d'eau présente dans le bois, influence le comportement du bois. Le comportement est relativement bien connu pour une gamme d'humidité comprise entre 0% et 30%. La littérature indique que pour des humidités situées au delà du point de saturation des fibres (30% à 60%) le comportement mécanique du bois ne varie pas. A titre d'exemple, la figure ci-dessous illustre l'évolution du module d'Young longitudinal en fonction de l'humidité.

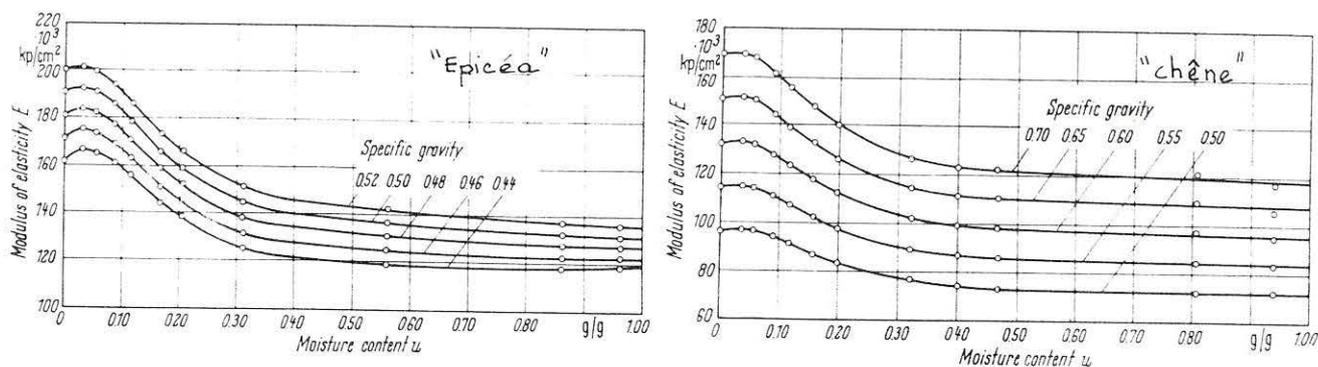


Figure 1.19 : Effet de l'humidité sur le module d'Young.(d'après Kollman, 1968)

Au sein d'un tronc d'arbre, généralement, l'aubier est plus humide que le duramen, toutefois les répartitions d'humidité, liées à l'activité physiologique de l'individu, elle même liée à d'autres paramètres (saison, conditions environnantes ...) (Gibbs,1958) restent complexes. Les courbes de répartition radiale d'humidité à différentes hauteurs de tiges de "peupliers" (figure 1.20) présentées par Lenz (1954), indiquent que la zone de transition située entre aubier et duramen est plus humide que le reste de la section où la répartition est relativement constante.

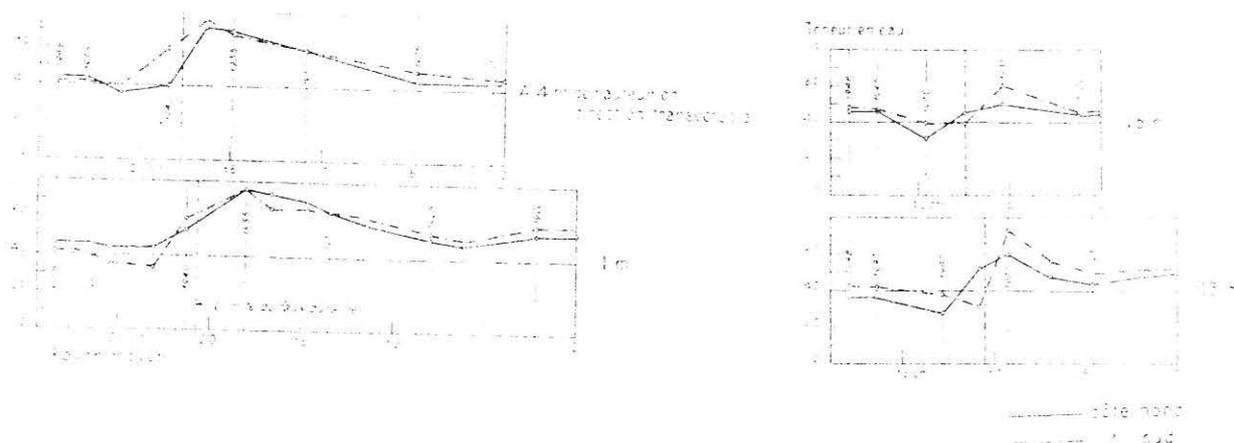


Figure 1.20 : Répartition d'humidité au sein d'un tronc d'arbre (d'après Lenz,1954)

Température

Malgré le rôle protecteur et isolant que joue l'écorce des gradients thermiques importants peuvent exister au sein des troncs, notamment en saison hivernale. Dans Giordano (1971), des mesures faites sur *Populus tremuloïdes*, indiquent les gradients de température que l'on peut observer entre différentes zones d'une section de tronc (figure 1.20). Ces gradients permettent de comprendre, en partie tout au moins, l'apparition de fente dans le plan (L,R) en saison hivernale (gélivure chez le "peuplier", le "chêne",...)

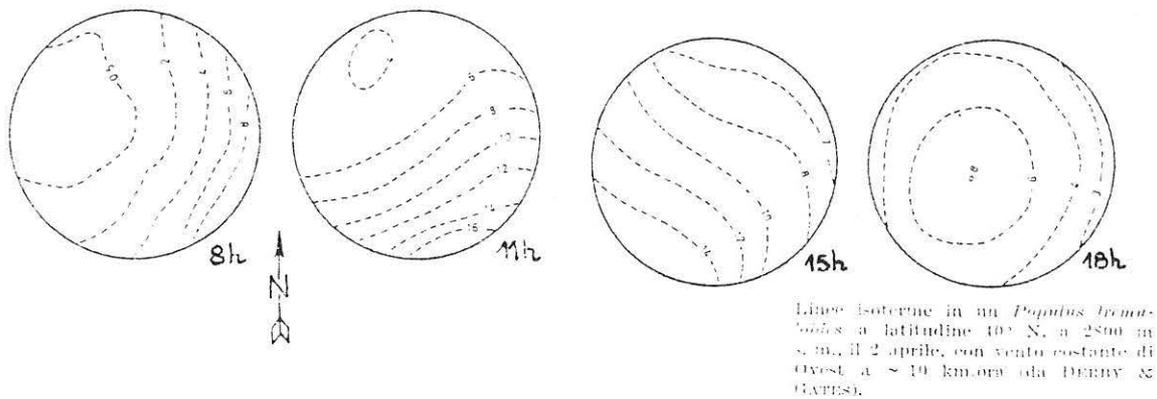


Figure 1.20 : Répartition thermique au sein d'un tronc (d'après Giordano,1971)

1.3.1.4. Hypothèses sur le matériau du tronc

Dans ce qui suit le matériau bois est considéré, a priori, comme macroscopiquement homogène. Des hétérogénéités macroscopiques (bois de tension par exemple) seront évoquées si nécessaire.

De plus, il sera supposé avoir un comportement élastique. Les paramètres humidité, température seront négligés ; les transformations seront isothermes (température ambiante $\approx 20^{\circ}\text{C}$) et à humidité constante ($H\% >$ humidité de saturation des fibres).

L'identification des différents termes de la matrice de souplesse (§1.3.1.2) pour diverses essences, à une humidité voisine de 12%, amène à constater généralement des relations d'ordre entre les différentes grandeurs.

Ainsi les différentes grandeurs vérifient les relations d'ordre suivante :

-les modules d'Young : $E_L \gg E_R > E_T$

-les coefficients de Poisson : $\nu_{RT} > \nu_{TL} \approx \nu_{LT} \approx \nu_{LR} \gg \nu_{TL} \approx \nu_{RL}$

-les modules de cisaillement : $G_{LR} > G_{TL} \gg G_{RT}$

exemple : d'après El Amri (1987) pour le "Peuplier blanc" (populus alba) ($H\% = 12\%$)

$E_L = 6800 \text{ MPa} \gg E_R = 1200 \text{ MPa} > E_T = 500 \text{ MPa}$

$\nu_{RT} = 0,36 \approx \nu_{TL} = 0,45 \gg \nu_{RL} = 0,017$

$G_{LR} = 1000 \text{ MPa} > G_{TL} = 900 \text{ MPa} \gg G_{RT} = 200 \text{ MPa}$

Compte tenu de l'importance du degré d'anisotropie entre les sens longitudinal et transverse, le matériau est considéré isotrope transverse : l'anisotropie au niveau d'une section droite du plan RT est donc négligée, il en est de même de l'inclinaison du fil.

A partir de ces hypothèses simplificatrices, la loi de comportement s'écrit avec les égalités suivantes :

$$E_X = E_Y ; \frac{\nu_{XZ}}{E_X} = \frac{\nu_{YZ}}{E_Y} ; G_{YZ} = G_{XZ}$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{XX} \\ \varepsilon_{YY} \\ \varepsilon_{ZZ} \\ 2\varepsilon_{YZ} \\ 2\varepsilon_{ZX} \\ 2\varepsilon_{XY} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_X} & \frac{-\nu_{XY}}{E_X} & \frac{-\nu_{ZX}}{E_Z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{XY}}{E_X} & \frac{1}{E_X} & \frac{-\nu_{ZX}}{E_Z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{ZX}}{E_Z} & \frac{-\nu_{ZX}}{E_Z} & \frac{1}{E_Z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{YZ}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{YZ}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{XY})}{E_X} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{XX} \\ \sigma_{YY} \\ \sigma_{ZZ} \\ \sigma_{YZ} \\ \sigma_{ZX} \\ \sigma_{XY} \end{pmatrix}$$

X et Y se réfèrent aux directions transversales (R-T) et Z la direction longitudinale (L).

1.3.2. Contraintes et déformations au niveau d'une section droite

On admet dans la suite que la forme de la section droite s'écarte peu d'une section elliptique de faible excentricité.

On se place dans le repère principal d'inertie $(G, \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$ de la section considérée

1.3.2.1. Contrainte normale locale σ_{ZZ}

L'effort normal et le moment fléchissant sont les éléments du torseur des efforts intérieurs qui entraînent une répartition de contrainte normale.

σ_{ZZ} est évaluée par une linéarisation en X et Y à partir des composantes de l'effort normal et du moment fléchissant, respectivement N, M_X et M_Y .

on a en un point P(X,Y,Z) de la section S :

$$\sigma_{ZZ}(X,Y,Z) = \frac{N}{S(Z)} - \frac{M_Y}{I_Y(Z)} X + \frac{M_X}{I_X(Z)} Y$$

de telle sorte que :

$$N = \int_{(S)} \sigma_{ZZ} dS$$

$$M_X = \int_{(S)} Y \sigma_{ZZ} dS$$

$$M_Y = \int_{(s)} -X \sigma_{ZZ} dS$$

Ces expressions résultent des définitions données au §1.2.1

1.3.2.2. Contraintes de cisaillement locales σ_{XZ} , σ_{YZ}

L'effort tranchant et le moment de torsion sont les éléments du torseur des efforts intérieurs qui résultent d'une répartition de contrainte de cisaillement.

σ_{XZ} et σ_{YZ} sont évaluées à partir des composantes de l'effort tranchant et du moment de torsion respectivement T_Y , T_Z et M_Z .

On a :

$$\sigma_{XZ} = \frac{T_X}{S(Z)} - \frac{MZ}{I_G(Z)} Y$$

$$\sigma_{YZ} = \frac{T_Y}{S(Z)} - \frac{MZ}{I_G(Z)} X \quad \text{avec } I_G = \int_{(s)} (X^2 + Y^2) dS$$

de telle sorte que :

$$T_X = \int_{(s)} \sigma_{XZ} dS$$

$$T_Y = \int_{(s)} \sigma_{YZ} dS$$

$$M_Z = \int_{(s)} (X \sigma_{YZ} - Y \sigma_{XZ}) dS$$

ces conditions étant en accord avec les définitions du § 1.2.1.

Les expressions de σ_{XZ} et σ_{YZ} donnent une valeur approchée des contraintes de cisaillements dues aux efforts tranchants. En effet, T_X et T_Y ne se répartissent jamais uniformément sur la section puisque les conditions aux limites imposent une contrainte de cisaillement nulle au contour.

Pour satisfaire les conditions au contour, on choisit arbitrairement une fonction parabolique de distribution des contraintes. Par exemple, dans notre cas, on prendra (en l'absence de moment de torsion) :

$$\sigma_{XZ} = \frac{4}{3} \frac{T_X}{S} \left(1 - \frac{X^2}{rA^2(Z)} \right) \quad \sigma_{YZ} = \frac{4}{3} \frac{T_Y}{S} \left(1 - \frac{Y^2}{rA^2(Z)} \right)$$

C'est une première approche des contraintes de cisaillement liées aux efforts tranchants.

1.3.2.3. Déformations associées

Si l'on admet que $\sigma_{XX}, \sigma_{YY}, \sigma_{XY}$ sont négligeables devant $\sigma_{ZZ}, \sigma_{XZ}, \sigma_{YZ}$, à partir de la loi de comportement isotrope transverse explicitée au § 1.3.1.3, les déformations associées à ce champ de contraintes sont :

$$\varepsilon_{XX} = \frac{-\nu_{ZX}}{E_Z} \left(\frac{N}{S(Z)} - \frac{M_{fY}}{I_Y(Z)} X + \frac{M_{fX}}{I_X(Z)} Y \right)$$

$$\varepsilon_{YY} = \frac{-\nu_{ZY}}{E_Z} \left(\frac{N}{S(Z)} - \frac{M_{fY}}{I_Y(Z)} X + \frac{M_{fX}}{I_X(Z)} Y \right)$$

$$\varepsilon_{ZZ} = \frac{1}{E_Z} \left(\frac{N}{S(Z)} - \frac{M_{fY}}{I_Y(Z)} X + \frac{M_{fX}}{I_X(Z)} Y \right)$$

$$(\varepsilon_{XX} = \varepsilon_{YY} = -\nu_{ZX} \varepsilon_{ZZ})$$

$$2 \varepsilon_{XZ} = \frac{1}{G_{XZ}} \left(\frac{K_X T_X}{S(Z)} - \frac{M_Z}{I_G(Z)} Y \right)$$

$$2 \varepsilon_{YZ} = \frac{1}{G_{YZ}} \left(\frac{K_Y T_Y}{S(Z)} - \frac{M_Z}{I_G(Z)} X \right)$$

$$2 \varepsilon_{XY} = \frac{2(1+\nu_{XY})}{E_X} \sigma_{XY} \approx 0$$

K_X et K_Y sont des facteurs de correction liés à la géométrie de la section : en effet, $\frac{1}{2G_{XZ}} \frac{K_X T_X}{S(z)}$ et $\frac{1}{2G_{YZ}} \frac{K_Y T_Y}{S(z)}$ sont les déformations moyennes de cisaillement de la section, reliées aux contraintes moyennes par un coefficient de proportionnalité qui dépend du matériau mais aussi de la géométrie de la section.

1.3.3. Déplacement de la section droite

Sous l'action des efforts normal, tranchants et des moments de flexion et de torsion, le déplacement de la section droite d'abscisse curviligne (s) qui est supposée restée plane, se décompose en 3 translations selon $\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}$ et 3 rotations selon $\vec{GX}, \vec{GY}, \vec{GZ}$.

Ce déplacement peut être déterminé par intégration des déformations à l'aide des formules de Bresse (Laroze, op. cit.) qui figurent ci-dessous.

- l'expression du déplacement en translation de la section (S₁) par rapport à la section (S₀) est :

$$\vec{U}_1 = \vec{U}_0 + \vec{\omega}_0 \wedge \vec{G}_0 \vec{G}_1 + \int_{s_0}^{s_1} \left(\frac{K_X T_X}{G_{XZ} S(Z)} \vec{X} + \frac{K_Y T_Y}{G_{XZ} S(Z)} \vec{Y} + \frac{N}{E_Z S(Z)} \vec{Z} \right) dS$$

$$+ \int_{s_0}^{s_1} \frac{M_Z}{G_{XZ} I_G} \vec{Z} \wedge \vec{C}_T \vec{G}_1 + \left(\frac{M_Y}{E_Z I_Y} \vec{Y} + \frac{M_X}{E_Z I_X} \vec{X} \right) \wedge \vec{G} \vec{G}_1 dS$$

- l'expression de la rotation $\vec{\omega}_1$ de la section (S₁) autour de G₁ compte tenu de la rotation $\vec{\omega}_0$ de la section (S₀) autour de G₀ est :

$$\vec{\omega}_1 = \vec{\omega}_0 + \int_{(s)} \left[\frac{M_Z}{G_{XZ} I_G} \vec{Z} + \frac{M_Y}{E_Z I_Y} \vec{Y} + \frac{M_X}{E_Z I_X} \vec{X} \right] dS$$

\vec{U}_0 et $\vec{\omega}_0$ représentent le déplacement et la rotation de la section de référence (S₀) par rapport au repère (O, $\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}$), déterminés par des conditions aux limites.

Dans les expressions ci-dessus, le centre de torsion de la section (C_T), est le point qui ne subit pas de déplacement transverse (dans le plan X,Y) : C_T(X_T, Y_T, 0) avec U_X(X_T, Y_T, Z) = 0 ; U_Y(X_T, Y_T, Z) = 0 ;

C_T est confondu avec le centre de la section. La rigidité de torsion est égale à : G_{XZ} . I_G

1.4. Les conditions aux limites

Précédemment, on s'est attaché à présenter ce qui se passe au niveau du fût. Dans ce qui suit, il s'agit de présenter les conditions que l'on peut rencontrer aux deux extrémités de ce fût, à l'extrémité aérienne et à l'encastrement.

1.4.1. L'extrémité aérienne

Celle ci est située à la base du houppier (ensemble des ramifications (branches et rameaux) non comprise dans le fût).

Les conditions à la limite Z = +L concernent le torseur des efforts appliqués par la partie aérienne sur le fût (figure1.22).

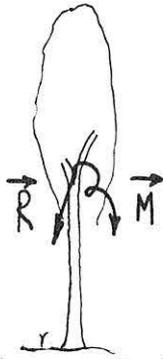


figure 1.22 : Efforts appliqués sur l'extrémité aérienne

Pour repérer ces efforts, des référentiels intermédiaires, liés à l'environnement de l'arbre sont nécessaires

1.4.1.1. Référentiels intermédiaires

Ces efforts sont repérés dans deux référentiels liés à l'environnement de l'arbre, qu'il est nécessaire de définir par rapport à $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$. Il s'agit d'un référentiel géographique obtenu à partir des points cardinaux et d'un repère topographique lié à la pente locale de la station.

Au paragraphe 1.1.1, on a désigné par \vec{C} la verticale du lieu ; celle-ci permet de définir :

- un référentiel géographique $(O, \vec{N}, \vec{W}, \vec{C})$ où :

O est l'origine située au centre de gravité de la section de base de l'arbre (situé au niveau du sol).

\vec{N} : suivant la direction nord magnétique

\vec{W} : suivant la direction ouest

\vec{N} et \vec{W} appartiennent au plan horizontal (H) défini par la verticale du lieu \vec{C} . Le passage du repère $(O, \vec{N}, \vec{W}, \vec{C})$ au repère $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ se fait par 2 rotations :

- une rotation d'angle θ autour de \vec{C} qui amène \vec{N} en \vec{A} et \vec{W} en \vec{y} (θ représente l'azimuth de la direction d'inclinaison de l'arbre)

- une rotation d'angle φ autour de \vec{y} qui amène \vec{A} en \vec{x} et \vec{C} en \vec{z} (φ représente un angle d'inclinaison de l'arbre)

La matrice de passage du repère $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ au repère $(O, \vec{N}, \vec{W}, \vec{C})$ s'écrit

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi\cos\theta & \cos\varphi\sin\theta & -\sin\varphi \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ \sin\varphi\cos\theta & \sin\varphi\sin\theta & \cos\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N \\ W \\ C \end{pmatrix}$$

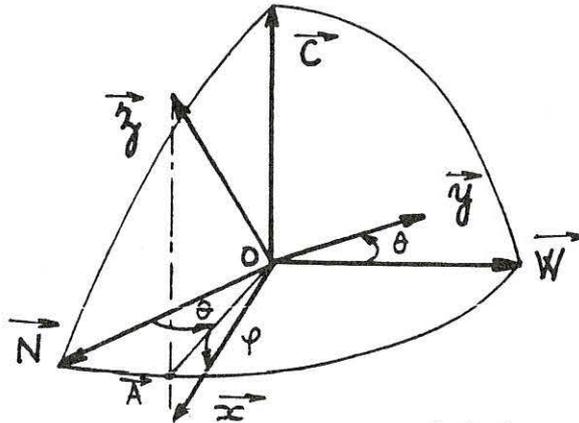


Figure 1.23 : Angles entre les repères $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ et $(O, \vec{N}, \vec{W}, \vec{C})$

Au référentiel géographique, il faut ajouter un repère lié au sol, nommé référentiel topographique $(O, \vec{P}, \vec{Q}, \vec{R})$. Il se déduit du repère géographique $(O, \vec{N}, \vec{W}, \vec{C})$ par les rotations suivantes :

- une rotation d'angle c autour de \vec{C} qui amène \vec{N} en \vec{A} et \vec{W} en \vec{Q} (c) l'azimuth de la pente, positionne celle-ci vis à vis des points cardinaux , le nord étant la référence
- une rotation d'angle p autour de \vec{Q} qui amène \vec{A} en \vec{P} et \vec{C} en \vec{R} $\text{tg}(p)$ représente la pente locale du terrain .

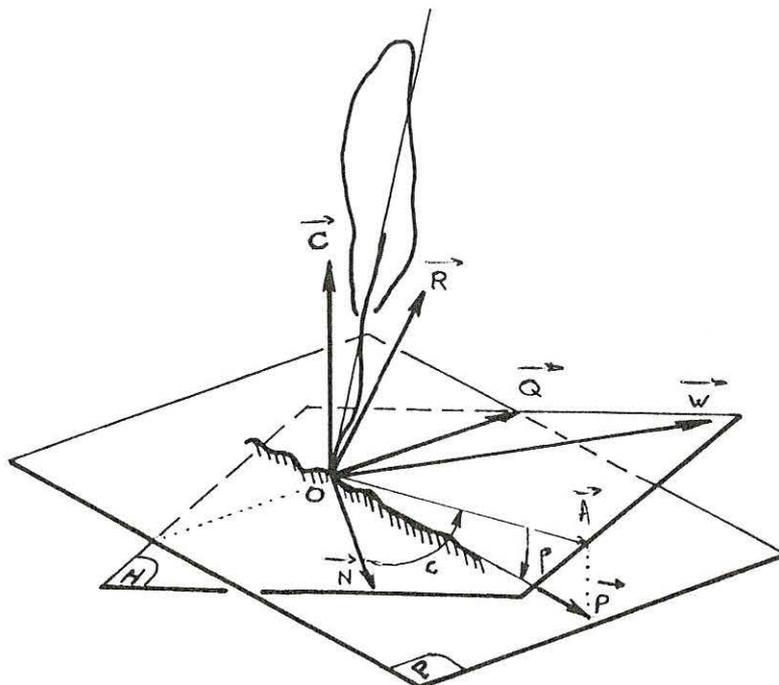


Figure 1.24 : Référentiels géographique et topographique associés à l'arbre

Le passage du repère $(O, \vec{P}, \vec{Q}, \vec{R})$ au repère $(O, \vec{N}, \vec{W}, \vec{C})$ s'écrit alors :

$$\begin{pmatrix} P \\ Q \\ R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos p \cos c & \cos p \sin c & -\sin p \\ -\sin c & \cos c & 0 \\ \sin p \cos c & \sin p \sin c & \cos p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N \\ W \\ C \end{pmatrix}$$

Ces changements de bases permettent d'exprimer dans le repère de l'arbre des conditions aux limites référencées dans les repères géographique (poids du houppier, poids de neige, de glace, vents) ou topographique (déplacement de la section située à la base du tronc donné par le déplacement du sol, vents).

1.4.1.2. Détermination des efforts en $z=+L$

Les sollicitations appliquées naturellement par la partie aérienne sur le tronc sont l'effet : du poids propre du houppier, des vents, d'un poids de neige, ou de glace.

Le poids propre de la partie aérienne représente un chargement sur la section droite considérée (S), chargement dont on ignore la masse et la position du centre de masse.

Toutefois les données issues des études de biomasses (Pardé, 1980) permettent d'obtenir un ordre de grandeur de la masse des différentes parties de l'arbres ; de plus, quelques auteurs ont mesuré sur des arbres abattus la position du centre de masse de l'arbre entier. Celle-ci se situe entre 30% et 40% de la hauteur totale de l'arbre pour les résineux étudiés (Adamovitch, 1975).

Si l'on considère uniquement le houppier comme charge, le centre de masse de ce houppier peut être excentré par rapport à l'axe \vec{OZ} . A partir des relevés de projections de cimes tels que le pratique le forestier, un critère d'excentricité est défini comme la distance entre le centre géométrique de la surface projetée et le pied de l'arbre. Toutefois la position en hauteur reste indéterminée mais peut être arbitrairement fixée.

Avec ce poids de houppier, d'autres sollicitations extérieures peuvent agir au niveau de la section droite (S) : les vents, une couche de neige ou de glace sur les branches. Lorsqu'un moment est appliqué sur la structure "arbre", celle-ci s'écarte de sa position d'équilibre jusqu'à atteindre parfois, un seuil de rupture. Il se traduit par une rupture des

fibres (coup de vent, cf § 1.1.2.3), ou plus spectaculaire une rupture du tronc, soit au niveau du sol ou à une hauteur quelconque.

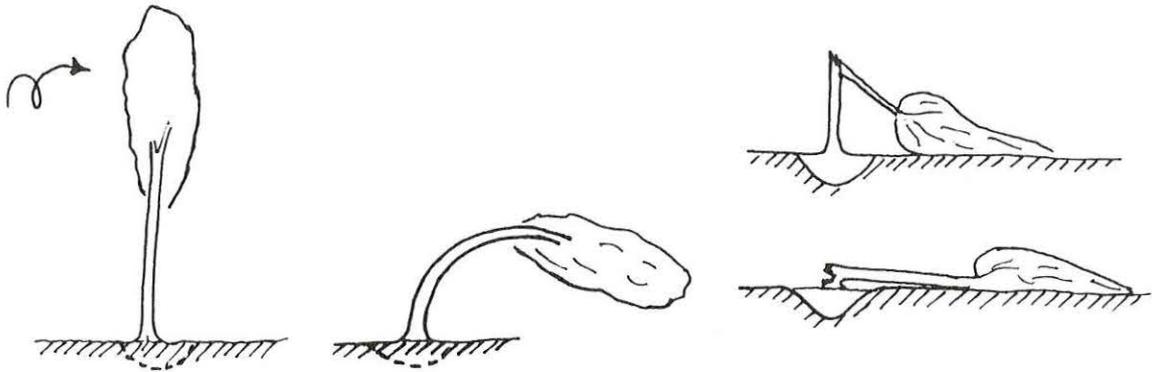


Figure 1.25 : Comportements de l'extrémité aérienne vis à vis de sollicitations

A la suite de ces considérations, il apparaît que le tronc a une fonction de support, dans l'arbre sur pied, qui se caractérise par la réponse de la structure à des sollicitations naturelles. L'application de sollicitations artificielles de courte durée (essais mécaniques de quelques minutes) permet la qualification de la structure ; la littérature fournit des exemples de ces essais (Vafai, 1986 ; Koizumi, 1986)

La modélisation proposée s'applique naturellement aux deux types de sollicitations évoquées, naturelles et artificielles.

1.4.2. L'encastrement

L'ensemble des racines ou appareil racinaire, constitue la partie de l'arbre généralement souterraine ; il est spécialisé dans les échanges d'eau et substances chimiques, et dans la fixation de l'arbre dans le sol. La stabilité de la structure arbre lors des diverses sollicitations (vents, neige...) est directement liée aux caractéristiques mécaniques du composite "racine-sol".

Le comportement de ce composite lors de sollicitations (efforts dus au vent, à la neige...) dépend de différents paramètres :

- du comportement à la compression du sol
- du comportement à la traction et à la compression des racines
- du poids du système racinaire
- de l'intensité des efforts : poussée du vent et poids de la structure
- de la morphologie du système racinaire. L'enracinement "traçant" lorsque les racines s'étalent dans les premières couches du sol (Peupliers, Epicéa commun,...) se distingue de l'encastrement "pivotant" où les racines s'enfoncent vers les couches les plus profondes du sol (Châtaignier, Sapin,...). Cet enracinement s'adapte aux particularités du

sol (profondeur, rétention en eau, déclivité,...), il se prolonge parfois hors du sol soit au niveau du fût, pour former les contreforts (§ 1.1.3), soit pour prendre des formes particulières.

En ce qui nous concerne, la position de l'encastrement est fixée au niveau du sol pour $z=0$. Les conditions à ce niveau sont des conditions en déplacement.

Le modèle prendra en compte différents cas de figures de comportement de l'arbre et du système racinaire assimilé à un composite constitué par les racines et le sol (cf figure 1.26) :

- les racines et la terre n'autorisent pas de rotation, l'encastrement est alors qualifié de rigide.

- l'enracinement se déplace de façon réversible, l'encastrement est supposé élastique. \vec{U}_0 et $\vec{\omega}_0$, le déplacement et la rotation de la section de référence (S_0), sont proportionnels au moment d'encastrement.

- lorsque l'arbre est sollicité, le système racinaire subit une légère rotation (quelques degrés) correspondant à une mise en place des racines et de la terre. Après cette première phase, l'encastrement est rigide ; seul le tronc se déplace et se déforme. Ce type d'encastrement est désigné comme "rigidifiant".

Dans les trois scénarios choisis, au-delà d'un certain niveau d'effort le déracinement complet ou partiel avec rupture des racines peut se produire. Cette situation ne fait pas l'objet du travail présenté dans la suite.

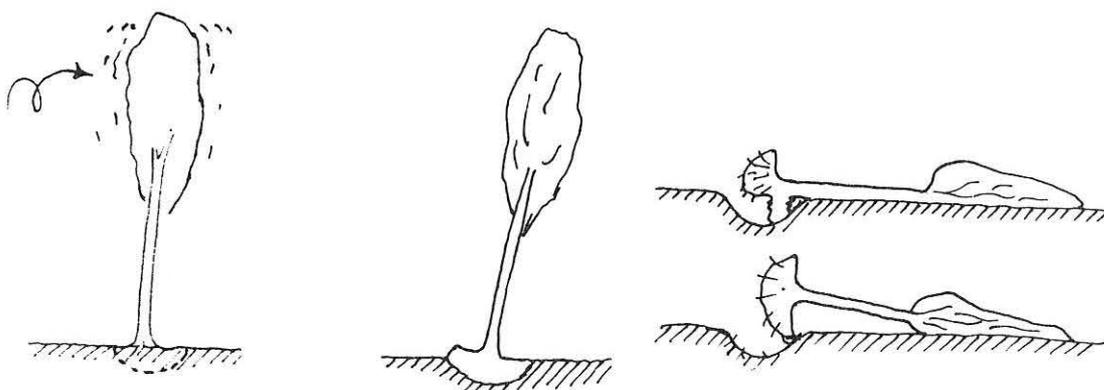


Figure 1.26 : Différents types de comportements du système racinaire vis à vis de sollicitations

1.5. Croissance et contraintes internes

1.5.1. Notion de géométrie évolutive

Entre deux états initial et final relativement éloignés dans le temps (une à plusieurs années) le tronc croît en longueur (élongation du méristème apical) et en diamètre (croissance secondaire) tandis que le houppier se développe en volume.

L'état mécanique final dépend des sollicitations appliquées et de l'apport continu ou rythmique de matière.

Cet apport de matière n'est pas pris en compte dans cette analyse qui est faite dans un intervalle de temps, suffisamment court, pour ne pas tenir compte des variations dimensionnelles de l'arbre. Quelques auteurs (Archer,1986, Fournier,1989) proposent des approches mathématiques de l'état mécanique d'un tronc où la croissance de la structure est prise en compte de façon itérative entre deux états, initial et final. Chaque pas représente l'apport d'une nouvelle couche de matière (bois initial, ou bois final ou un cerne).

L'analyse des effets du poids propre ne concernera pas les effets de la croissance du houppier et du tronc comme l'a réalisée Martley en 1928 (l'auteur a calculé l'influence de l'accroissement de poids propre de la structure, sur l'état mécanique d'une section du tronc, au cours des croissances annuelles, sans sollicitation externe.)

Dans ce qui suit, seule la contribution du poids propre du houppier au déséquilibre de l'arbre, lié à une sollicitation artificielle est étudiée.

1.5.2. Notion de contraintes internes

Le matériau bois des troncs d'arbres est le siège de contraintes internes liées à plusieurs facteurs d'ordre physique (température, humidité) et bio-physico-chimique (phénomène de maturation cf.§ 1.5.2.2). Celles-ci ne seront pas étudiées ici, mais pourraient être superposées, pour l'étude de couplages éventuels, avec les effets des sollicitations externes (effet de seuil engendrant des ruptures).

1.5.2.1. Sécheresse et retrait au gel

Le bois de l'arbre sur pied subit, lors de variations atmosphériques, des variations dimensionnelles, qui entraînent dans la structure des contraintes internes, pouvant occasionner des traumatismes : gélivures

du peuplier, du chêne (Kübler,1987 ; Cinotti et al.1988 ;...), fentes sur pied de certains résineux (Boulet Gercourt et Nepveu,1987 ; ...). Les concepts de la thermo-élasticité permettent de modéliser les efforts internes occasionnés par des variations de température ou d'humidité (Tahani,op.cit.; Fournier,op.cit.) et de quantifier, dans un tronc de géométrie connue, les contraintes supposées à l'origine de ces fentes sur pied, à partir de valeurs de retraits données sur de petits échantillons (cubes ou carottes de sondage).

Il apparait notamment que dans le bois vert, entre 30 et 90% d'humidité, l'eau qui a migrée dans les lumens, gèle lorsque la température baisse au-dessous de 0°C. Ce phénomène entraîne un "retrait au gel" dû à un "séchage" des parois cellulaires. Ce retrait au gel entraîne parfois, des ruptures dans le plan LT : les gélivures, observables sur chênes, peupliers,....

Par contre, pour H% > 90%, il y a gonflement du volume d'eau dans les lumens, ce qui entraîne une "expansion au gel" (Cinotti et al., op.cit.)

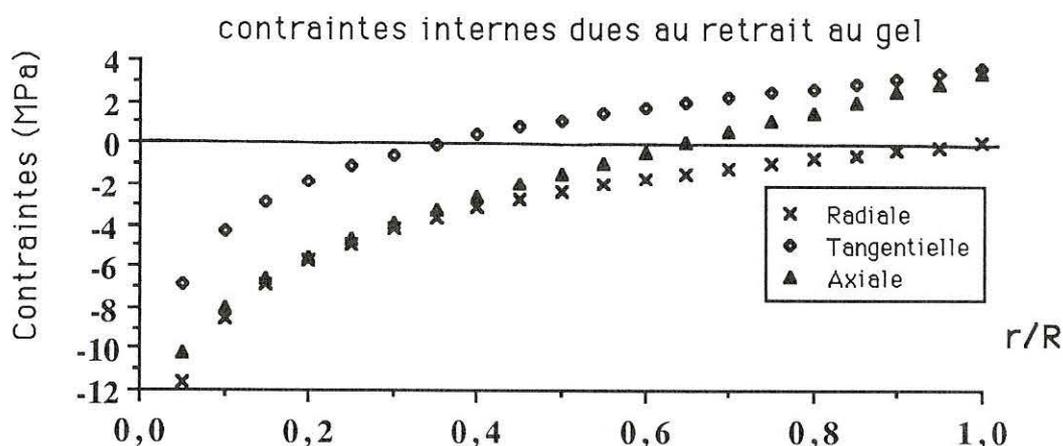


Figure 1.27 : Modèle de contraintes de "retrait au gel" (d'après Cinotti et Tahani, 1988)

1.5.2.2. Contraintes de croissance - réorientation et stabilité des tiges

Aux contraintes internes d'origine physique liées à la température et à l'humidité, s'ajoutent les contraintes d'origine bio-physico-chimique résultant de la croissance et de la maturation.

Les cellules nouvellement formées se répartissent symétriquement ou non par rapport à la moëlle, leur forme géométrique n'est pas encore figée. Leurs parois sont élaborées à partir de différentes couches imbriquées les unes sur les autres. Une littérature abondante (Wardrop & Dadswell,1950; Monties et al,1980; ...) donne une description des

différentes couches constitutives de la paroi cellulaire : la membrane mitoyenne, les parois primaire et secondaire.

Suivant les messages que les cellules "mères" ont reçu avant la différenciation, les nouvelles cellules ont des caractéristiques spécifiques de leur fonction (tissus de soutien, de conduction...).

L'épaisseur des parois varie, ainsi que la nature et les proportions des principaux constituants chimiques (essentiellement cellulose, hémicelluloses et lignines).

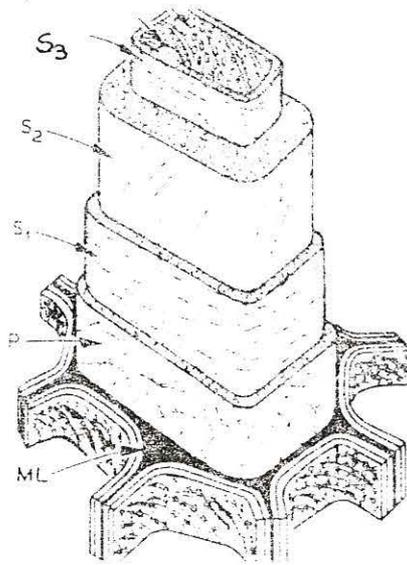


Figure 1.28 : Les différentes parois de la cellule (d'après Butterfield, 1980)

Lorsque la cellule prend du volume au cours des transformations physico-chimiques (lignification et cristallisation des parois), elle a tendance à se déformer. Cette déformation est contrariée par les autres cellules qui suivent également des transformations, et par la présence d'un noyau de matière rigide formé auparavant (par exemple l'année précédente). Il en résulte des efforts intérieurs : les contraintes de croissance.

L'origine du phénomène est largement discutée et controversée dans la littérature ; Boyd (1950-a) avance et confirme (Boyd,1985) l'hypothèse suivante : au cours du processus de lignification (la matrice de "lignine" se forme autour des microfibrilles de cellulose) de la paroi, la cellule tend à se raccourcir longitudinalement et à gonfler transversalement. Wardrop (1965) qui a réalisé une synthèse sur la formation et la fonction du bois de réaction est d'accord sur cette hypothèse. Par contre, Bamber (1979) évoque la pression au sein de la cellule et récemment Bamber (1987) attribue ce processus à la contraction des microfibrilles liée à la cristallisation de la cellulose (dans la couche (S2)). Bien que le débat concernant l'origine physique du phénomène

reste ouvert, il est admis par tous que les contraintes internes dites de "croissance" résultent de déformations induites par l'élaboration de la paroi secondaire des trachéides des résineux et des fibres chez les feuillus : les "déformations de maturation" (Wilson,1981 ; Bordonné & Okuyama,1987 ;...).

Kübler (1959) ; Archer (1974 et 1987) ; Gillis (1978) ; Okuyama (1978 et 1986), Fournier (1989);... proposent des modèles de complexité différente, pour décrire à partir des déformations de maturation qui caractérisent le matériau bois, l'état de contrainte d'un tronc (ou d'une branche). Ces modèles sont vérifiés partiellement sur le plan expérimental.

Ces contraintes internes contribuent à la fonction physiologique de support du tronc en agissant sur la résistance mécanique des tiges (Kübler,1959) et en permettant sa réorientation spatio-temporelle (Wilson et Archer,1973; Hejnowicz,1967;...)

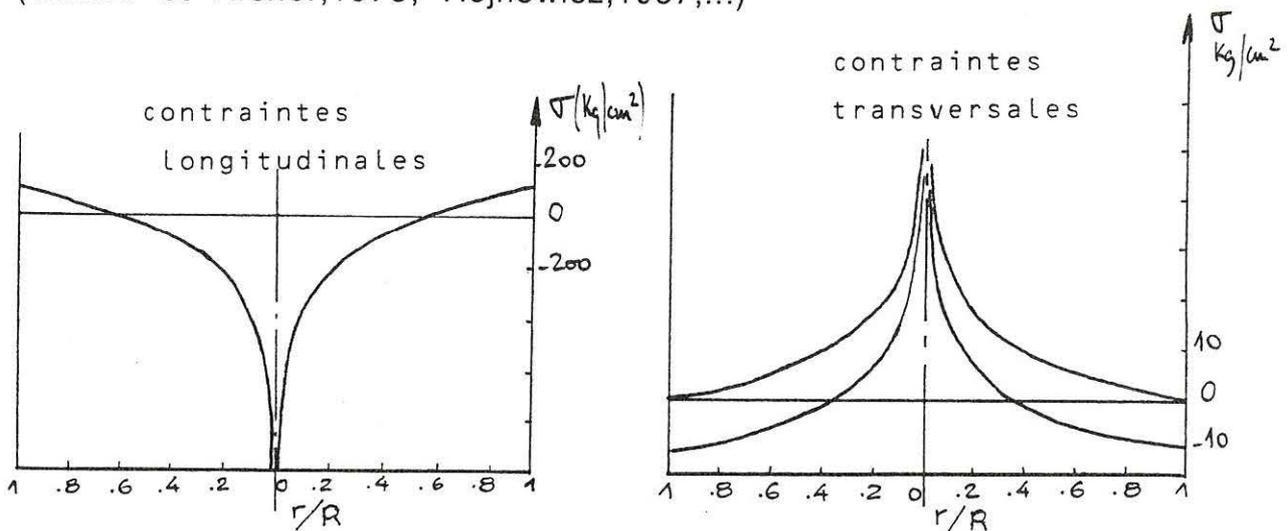


Figure 1.29 : Modèle de contraintes de croissance (d'après Kübler,1959)

Ainsi que cela a déjà été dit plus haut, l'évolution de l'arbre dans l'espace et le temps est conditionnée par son génotype, des paramètres écologiques (conditions atmosphériques...) et sylvicoles (type de traitement,...). En fonction de ces paramètres, l'arbre utilise une stratégie afin de croître, se positionner, se ramifier pour assurer de façon optimum la fonction de photosynthèse nécessaire à son développement. La capacité de l'arbre à optimiser son orientation spatiale se réalise grâce à une croissance radiale différentielle, à son aptitude à se fléchir et se tordre. La réaction physique de la plante se fait schématiquement en quatre phases :

- perception de l'information apporté par un stimulus (par exemple un gradient d'éclairement),

- élaboration et transmission d'un vecteur chimique (auxines...) de l'information,
- capture de l'information par des cellules prédisposées à la réception (par exemple située au niveau du cambium)
- réponse physiologique au niveau de la croissance par la création de matière (nouvelles cellules).

La quantité de matière est inégalement répartie et les caractéristiques physiques et mécaniques du tissu diffèrent d'un endroit à l'autre : par exemple des parois plus épaisses dans le bois de réaction (dépôt de cellulose sur S2 pour le bois de tension (Wardrop et al. op.cit.;...)) des déformations de maturation plus élevées dans le bois de tension (Okuyama,1986 ; Langbour,1986 ;...).

1.6.Conclusion

Ce premier chapitre a montré d'une façon générale que la forme et l'état mécanique d'un arbre à un moment donné de sa vie résultent de son patrimoine génétique, de son adaptation spatiale, de l'évolution de sa géométrie (croissance radiale et élongation) et des diverses sollicitations qu'il a subies.

Cela se traduit par des variations de forme de sections, des hétérogénéités de matériau (présence ou non de bois de réaction) et une importante variabilité des caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques.

La structure arbre regroupant l'enracinement, le fût et le houppier telle qu'elle vient d'être présentée (géométrie, propriétés du matériau, conditions aux limites) est assimilée à une poutre ; celle-ci est encadrée à l'une de ces extrémités et chargée de l'autre.

L'arbre ainsi schématisé, est dans ce qui suit, sollicité artificiellement en vue d'évaluer les propriétés élastiques du bois du fût.

Chapitre 2

Essai de flexion statique sur un arbre forestier

Dans un souci de compréhension des différents dégâts forestiers dus aux tempêtes ou à une surcharge de neige, différentes équipes ont mené des recherches sur ce thème.

Ainsi Nakatani et al. (1984), Mamada et al. (1984) ont orienté leur travail sur le comportement de la structure "arbre et enracinement" vis à vis d'une sollicitation du type "surcharge de neige". Des essais de flexion statique destructifs sont réalisés sur de jeunes résineux (*Cryptomeria japonica* D.Don.) pour étudier le comportement du tronc et de l'enracinement .

Shihua (1984) utilise des principes d'aérodynamique et de la dynamique des poutres pour modéliser les dégâts de tornades sur l'Hévéa, essence réputée pour être particulièrement sensible au vent.

Koizumi (1987) analyse le comportement, dans le domaine élastique, de troncs dont il prend en compte le caractère multicouche. Il propose un test de flexion statique adapté à de jeunes résineux, pour évaluer les propriétés élastiques du bois juvénile dans l'arbre. Il analyse ensuite le comportement du tronc et de l'encastrement à la rupture.

Pyles & al. (1987, 1988) déterminent le module d'élasticité de troncs de Douglas de deuxième génération, croissant en Amérique du Nord, pour une qualification en vue de les utiliser comme mâts haubanés lors de l'exploitation forestière. Son approche type "résistance des matériaux" s'accompagne d'essais de flexion statique sur des troncs sans houppier et haubanés.

Dans ce chapitre, l'objectif est d'évaluer les propriétés élastiques du bois dans l'arbre, structure élancée, au moyen d'un essai de flexion statique ; cet essai apparait comme le mieux adapté à l'arbre.

On propose alors, une analyse de l'essai de flexion d'une structure schématisée par ordre de difficulté croissante . En premier, l'essai est réalisé sur un fût schématisé en tronc de cône homogène et élancé.

En second, trois scénarios d'encastrement de ce tronc de cône sont proposés, puis l'influence d'un chargement extérieur du tronc, matérialisé par le poids du houppier est envisagée.

2.1. Essai de flexion sur un tronc de cône élancé

L'arbre est schématisé d'un point de vue géométrique, mais également en ce qui concerne les caractéristiques élastiques du matériau. La configuration de l'essai de flexion statique est idéalisée, l'écriture du problème s'en trouve simplifiée. L'analyse de l'influence des différents paramètres sur les grandeurs mesurées, est proposée.

2.1.1. Approximation géométrique

- le tronc est assimilé à une poutre droite. La flexuosité du tronc ou la déviation de la ligne moyenne par rapport à l'axe \vec{OZ} définie au § 1.1.1 se trouve donc négligée.

-le tronc est vertical sur un terrain plat ou localement de niveau . Les repères géographique $(O, \vec{N}, \vec{W}, \vec{C})$ et topographique $(O, \vec{P}, \vec{Q}, \vec{R})$ décrits au § 1.4.1.2 sont confondus avec le repère $(O, \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$.

- l'enracinement du tronc est rigide et n'impose donc ni déplacement, ni rotation de la section de base S_0 .

- le tronc est supposé être de forme conique à section droite elliptique comme l'indique le dessin figure 2.1. L'évolution des rayons avec la hauteur est choisie linéaire :

$$A(Z) = \frac{A(L)-A(0)}{L} \cdot Z + A(0)$$

La conicité α est définie par :

$$(2.1) \quad \alpha = \left(\frac{A(L)-A(0)}{L} \right)$$

$$(2.2) \quad B(Z) = r \cdot A(Z)$$

Le coefficient r caractérise le caractère elliptique de la section. Le cas $r = 1$ correspond au cas particulier d'une section circulaire.

2A est le grand axe de l'ellipse il est orienté suivant \vec{OY} . Par conséquent 2B est orienté suivant \vec{OX} .

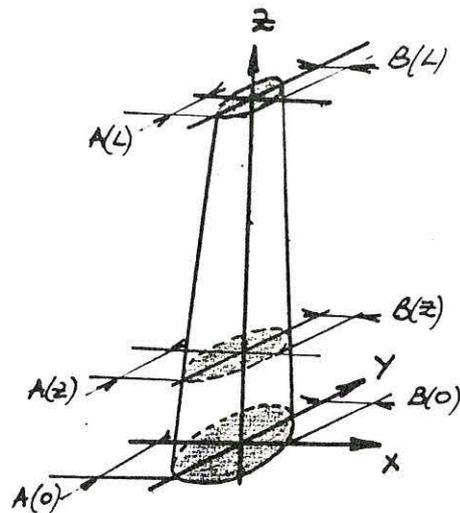


Figure 2.1 : Schéma du cône elliptique

Soit $S(Z)$ une section droite courante située entre la base et la cote L , ces moments quadratiques s'expriment alors :

$$(2.3) \quad I_X(Z) = \frac{\pi \cdot r \cdot A^4(Z)}{4} \quad I_Y(Z) = \frac{\pi \cdot r^3 \cdot A^4(Z)}{4}$$

Par la suite, les applications numériques seront faites à partir des données géométriques réalistes suivantes :

$$\begin{aligned} 2A(0) &= 0,25 \text{ m} & 2A(L) &= 0,19 \text{ m} \\ 2B(0) &= 0,24 \text{ m} & 2B(L) &= 0,18 \text{ m} \quad (r=0,96) \\ L &= 10 \text{ m} ; \phi &= 20^\circ & \text{(cf figure 2.2)} \end{aligned}$$

2.1.2. Le matériau

Les hypothèses faites sur le matériau bois du tronc sont explicitées au § 1.3.1 du chapitre 1.

Le tronc-poutre est constitué d'un matériau continu, homogène et élastique.

Les caractéristiques élastiques sont calculées à partir du modèle prévisionnel "type feuillu" présenté dans El Amri (1987) ; les valeurs calculées avec une masse volumique de $\rho_{12} = 0,44 \text{ g/cm}^3$ sont corrigées pour tenir compte d'une humidité supérieure à 12% (in Guitard, 1987) prise arbitrairement égale à 30% (on admet qu'au delà de 30%, les caractéristiques élastiques n'évoluent pas)

$$\begin{aligned} E_L &= 7000 \text{ MPa} ; E_R = 500 \text{ MPa} ; E_T = 240 \text{ MPa} \\ G_{LT} &= 270 \text{ MPa} ; G_{LR} = 370 \text{ MPa} ; G_{RT} = 85 \text{ MPa} \\ E_R/\nu_{RT} &= 710 \text{ MPa} ; E_T/\nu_{TL} = 9400 \text{ MPa} ; E_L/\nu_{LR} = 12000 \text{ MPa} \end{aligned}$$

2.1.3. Efforts liés à l'essai de flexion statique

L'arbre est soumis à un moment fléchissant par l'application d'une gamme d'efforts (F) à une hauteur $Z = L$.

L'effort appliqué, est tel que l'arbre s'écarte de sa position d'équilibre de façon significative, sans endommagement de la structure (partie aérienne et souterraine).

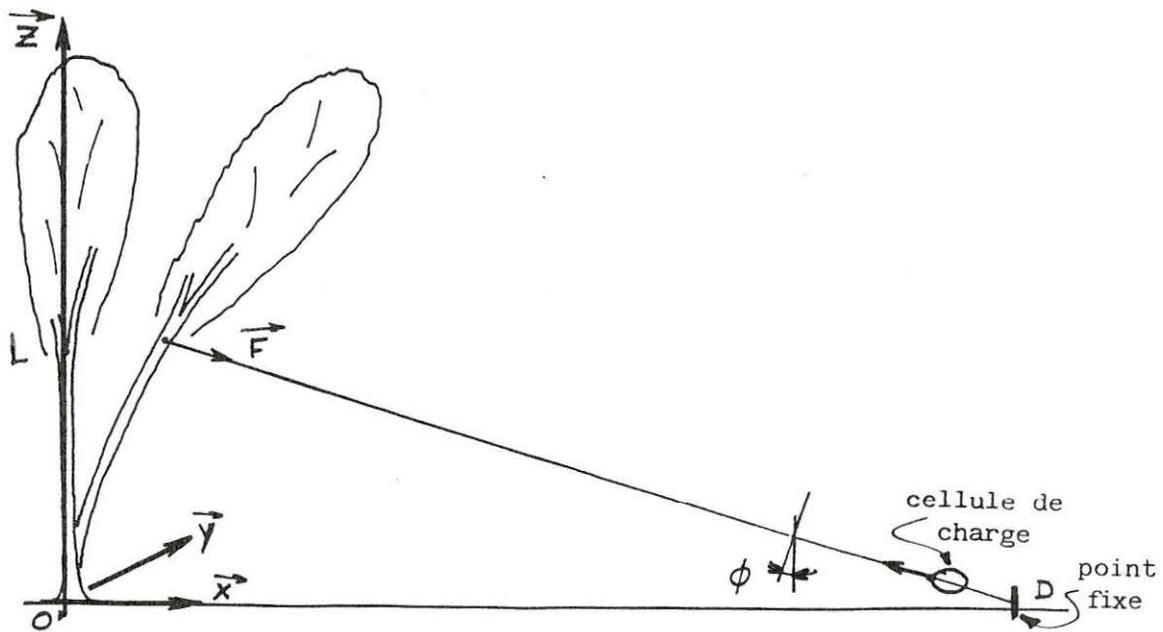


Figure 2.2 : Schéma de principe de flexion statique d'un arbre

Le point d'ancrage (D) est tel que OD soit dans le plan défini par \vec{X} et \vec{Z} .

Pour chaque effort appliqué, on envisage de mesurer :

- le déplacement du point d'application de l'effort,
- les déformations longitudinales locales au niveau d'une section droite située à hauteur d'homme ($Z < 2$ mètres)

(Les méthodes expérimentales choisies, seront décrites au chapitre 3)

Compte tenu de cette sollicitation, au niveau d'une section droite située à une cote Z , le torseur des efforts extérieurs se limite à :

- un effort normal $N_Z(Z)$
- un effort tranchant $T_X(Z)$
- un moment fléchissant $M_Y(Z)$

Les conditions d'encastrement rigide imposent des déplacements et des rotations nulles pour $Z=0$ (cf. § 1.4.2)

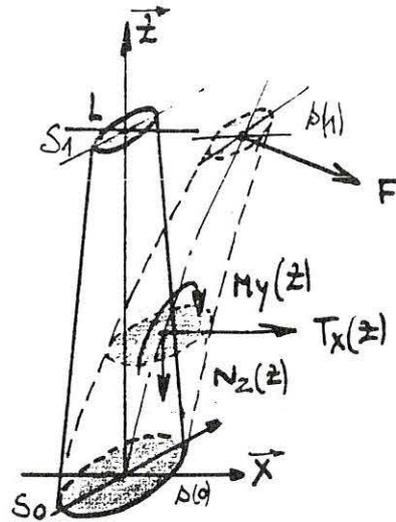


Figure 2.3 : Bilan des efforts sur le tronc simplifié

A partir de ces hypothèses et en accord avec les définitions explicitées au chapitre 1 (§1.2.1), l'expression des éléments du torseur prend la forme suivante:

$$(2.4) \quad \begin{aligned} N_Z(Z) &= -F \cdot \sin \phi \\ T_X(Z) &= F \cdot \cos \phi \\ M_Y(Z) &= F \cdot \cos \phi (L-Z) \end{aligned}$$

(le moment lié à composante verticale de F , $(F \sin \phi [UX(L) - UX(Z)])$ est négligé)

2.1.4. Déformations, déformée et flèche en $Z = L$

Connaissant les éléments du torseur des efforts et compte tenu de la loi de comportement choisie, on est en mesure d'exprimer les différentes déformations résultantes : déformations longitudinales, tangentielles et de cisaillement.

2.1.4.1 Déformations longitudinales et transverses

En accord avec les expressions données au § 1.3.2.3, les déformations associées à ces efforts sont pour un point P quelconque de la section (S) (cf figure 2.4) :

$$\epsilon_{ZZ}(X,Y,Z) = \frac{1}{E_Z} \left(\frac{N_Z}{S} - \frac{M_Y}{I_Y} X \right)$$

$$\epsilon_{XX} = \epsilon_{YY} = -\nu_{XZ} \epsilon_{ZZ}$$

Comme nous envisageons de relever des déformations en périphérie d'une section de tronc, regardons pour un point C, situé sur le contour de la section (cf figure 2.4) l'expression de ces déformations.

C a pour coordonnées : $C(X,Y,Z) = (r A \cos\lambda, A \sin\lambda, Z)$, les déformations s'expriment alors :

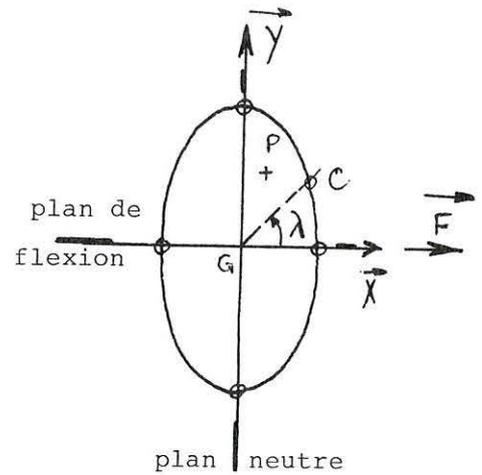


Figure 2.4 : Points singuliers d'une section

$$\varepsilon_{zz}(X,Y,Z) = \frac{1}{E_Z} \left(\frac{-F \sin \phi}{\pi r A^2} - \frac{4F \cos \phi (L-Z) \cos \lambda}{\pi r^2 A^3} \right)$$

Pour les valeurs particulières de λ égales à $+\frac{\pi}{2}$ et $-\frac{\pi}{2}$, correspondantes aux points situés dans le plan neutre, l'expression ci-dessus devient :

$$\varepsilon_{zz}(0,A,Z) = - \frac{1}{E_Z} \left(\frac{F \sin \phi}{\pi r A^2} \right)$$

Lorsque λ prend les valeurs 0 ou π , correspondantes aux points situés dans le plan de flexion imposé, on a :

$$\varepsilon_{zz}(rA,0,Z) = \frac{1}{E_Z} \left(\frac{-F \sin \phi}{\pi r A^2} - \frac{4F \cos \phi (L-Z)}{\pi r^2 A^3} \right)$$

cette expression, qui peut se mettre sous la forme :

$$(2.5) \quad \varepsilon_{zz}(rA,0,Z) = - \frac{4F \cos \phi (L-Z)}{\pi r^2 A^3 E_Z} \left(1 + \frac{r A \operatorname{tg} \phi}{4 (L-Z)} \right)$$

permet de montrer que le terme lié à l'effort normal $\left(\frac{r A(Z) \operatorname{tg} \phi}{4 (L-Z)} \right)$ est négligeable devant l'unité ; en effet, une application numérique avec une section droite située à la cote $Z=1$ ($A(X,Y,1) = 0,122$ m, $r=0,96$, $E=7000$ MPa, $Z=1$ m, $F = 1000$ N, $\phi = 20^\circ$, $L = 10$ m) donne :

$$\left(\frac{r A(1) \operatorname{tg} \phi}{4 (L-1)} \right) \approx 1,2 \cdot 10^{-3} \ll 1$$

Pour les points du plan de flexion, situés en périphérie de la section S, la déformation longitudinale est essentiellement due au moment fléchissant appliqué sur la poutre : $\varepsilon_{ZZ}(+rA,0,Z) = -920.10^{-6}$ dans notre exemple.

Les points situés sur le plan neutre se déforment uniquement sous l'effet de compression de l'effort normal. Toutefois, l'application numérique effectuée pour la valeur de $\lambda = +\frac{\pi}{2}$, donne une valeur de $\varepsilon_{ZZ}(0,A,Z)$ égale à $-1,1.10^{-6}$, c'est à dire une valeur difficilement mesurable sur le terrain.

incidence d'un décalage angulaire sur la position des points de mesure de déformation vis à vis des plans de flexion et neutre.

Les points situés à proximité du plan de flexion correspondent à des angles λ proches de 0 ou de π ; pour ces points les déformations longitudinales s'écrivent :

$$\varepsilon_{ZZ}(rA,0,Z) = -\frac{4F\cos\phi (L-Z)}{\pi r^2 A^3 E_Z} \cos\lambda$$

l'erreur relative $\left(\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}\right)$ due à une erreur de positionnement en λ , s'écrit

$$\text{alors : } \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\Delta\lambda^2}{2} (\lambda \text{ en radian})$$

A titre d'exemple, une valeur de λ égale à 5° donne une erreur relative $\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}$ de 0,4%. Ainsi au lieu de mesurer $\varepsilon_{ZZ}(+rA,0,Z) = -920.10^{-6}$ (valeur trouvée ci-dessus) la valeur serait de $\varepsilon_{ZZ}(+rA,0,Z) = -916.10^{-6}$. L'incidence d'un décalage angulaire pour des points proches du plan de flexion est relativement faible sur les valeurs de déformations longitudinales mesurées. Voyons le cas des points situés à proximité du plan neutre. Les déformations longitudinales s'écrivent :

$$\varepsilon_{ZZ}(X,Y,Z) = \frac{1}{E_Z} \left(\frac{-F\sin\phi}{\pi r A^2} - \frac{4F\cos\phi (L-Z) \cos\lambda}{\pi r^2 A^3} \right)$$

Dans ce voisinage, les valeurs des déformations sont relativement faibles, l'incertitude sur $\Delta\varepsilon$ est donnée pour λ en radian et voisin de $+\frac{\pi}{2}$, par :

$$\Delta\varepsilon = \frac{4F\cos\phi (L-Z)}{\pi r^2 A^3} \Delta\lambda$$

Une application numérique avec $\Delta\lambda = 5^\circ$ et $B = -920 \cdot 10^{-6}$, donne $\Delta\varepsilon = -80 \cdot \mu\text{def}$.

Les points de mesure situés au voisinage du plan neutre se déforment de façon significative et d'autant plus qu'ils s'écartent de ce plan.

Pratiquement, si des points de mesure de déformations, sont situés en dehors du plan de flexion et du plan neutre, les déformations longitudinales enregistrées sont comprises entre deux valeurs extrêmes, une valeur maximum et une valeur nulle.

Comparaison des déformations de deux sections du tronç.

Soient deux sections S_1 et S_2 situées à la cote Z_1 et Z_2 du point d'application de l'effort, distantes de (d): $d = Z_2 - Z_1$

Les expressions des déformations longitudinales maximales dans S_1 et de S_2 sont :

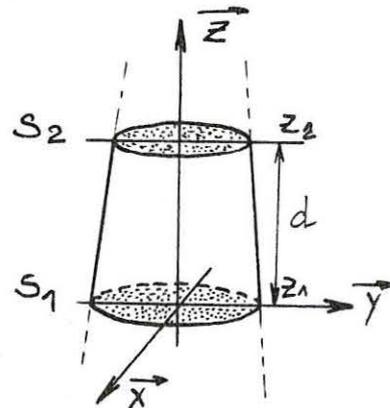


Figure 2.5 : Schéma des sections (S_1) et (S_2)

$$\varepsilon_{zz}(-rA,0,Z_2) = \frac{4F\cos\phi (L-Z_2)}{\pi r^2 A^3(Z_2) E_Z} = \varepsilon_{zz}(-rA,0,Z_1) \cdot \frac{(L-Z_2)A^3(Z_1)}{(L-Z_1)A^3(Z_2)}$$

soit le rapport :

$$\frac{\varepsilon_{zz}(-rA,0,Z_2)}{\varepsilon_{zz}(-rA,0,Z_1)} = \left(1 - \frac{d}{L-Z_1}\right) \left(1 + \frac{\alpha d}{A(Z_1)}\right)^{-3}$$

A titre d'exemple, considérons les données suivantes :

$d = 1 \text{ m}$; $Z_1 = 0,5 \text{ m}$; $L = 10 \text{ m}$; $\alpha = -0,003$; $A(Z_1) = 0,125 \text{ m}$; $r=1$

$$\frac{\varepsilon_{zz}(-rA,0,Z_2)}{\varepsilon_{zz}(-rA,0,Z_1)} = 0,96$$

les déformations maximales de la petite section S2 sont de l'ordre de 4% inférieures à celles de la grande section S1. La poutre conique n'est donc pas une poutre isocontrainte. Toutefois une incertitude de quelques centimètres sur la cote Z de la section droite de mesure sera d'un effet négligeable sur les valeurs de déformations ϵ_{ZZ} observées .

2.1.4.2 Déformations de cisaillement

En accord avec les définitions et les hypothèses données aux § 1.3.2.2 l'expression des déformations de cisaillement pour une section droite est :

$$\epsilon_{XZ}(X,Y,Z) = \frac{2}{3G_{XZ}} \frac{T_X}{S} \left(1 - \frac{X^2}{(rA(Z))^2} \right)$$

En tout point du contour, $X = rA(Z)\cos \lambda$, il vient :

$$\epsilon_{XZ}(rA(Z)\cos\lambda, A(Z)\sin\lambda, Z) = \frac{2}{3G_{XZ}} \frac{T_X}{S} (\sin^2 \lambda)$$

ϵ_{XZ} est maximum pour les 2 points situés sur l'axe \vec{OY} ($\lambda = \pm \frac{\pi}{2}$) ; ϵ_{XZ} est nulle pour les points où $\lambda = 0$ et $\lambda = \pi$

Avec les valeurs numériques citées précédemment, et une section droite située à la cote $Z_1 = 1$ m, la valeur maximale de la déformation vaut :

$$\epsilon_{XZ}(Z_1) \approx 32 \cdot 10^{-6}$$

Commentaires :

L'ordre de grandeur des déformations de cisaillement ϵ_{XZ} est relativement faible devant celui des déformations longitudinales liées au moment fléchissant ϵ_{ZZ} , mais peuvent être évaluées expérimentalement. Par conséquent, une attention plus particulière sera portée dans la phase expérimentale à la mesure des déformations longitudinales ϵ_{ZZ} . Les déformations tangentielles et de cisaillement, qui seront mesurées sur un nombre plus restreint d'arbres.

2.1.5. Expressions de la déformée et de la flèche en $Z = L$

On se place au niveau d'une section droite, de cote Z, le déplacement suivant X est donnée par la composante U_X du déplacement. En particulierisant la formule de Bresse, explicitée au § 1.3.3 :

$$\vec{U}_1 = \vec{U}_0 + \vec{\omega}_0 \wedge G_0 \vec{G}_1 + \int_{s_0}^{s_1} \left(\frac{4 T_X(Z)}{3 G_{XZ} S(Z)} \vec{X} + \frac{M_Y}{E_Z I_Y} \vec{Y} \wedge G_0 \vec{G}_1 \right) ds$$

l'encastrement rigide impose $\vec{U}_0 = \vec{\omega}_0 = \vec{0}$ d'où :

$$U_X(Z_1) = \frac{4 F \cos \phi}{3 G_{XZ}} \int_{z_0}^{z_1} \frac{dZ}{S(Z)} + \frac{F \cos \phi}{E_Z} \int_{z_0}^{z_1} \frac{(L-Z)(Z_1-Z)}{I_Y(Z)} dZ$$

après intégration avec le changement de variable suivant :

où : $T(Z) = \frac{A(Z)}{A(0)} = 1 + \frac{\alpha Z}{A(0)}$, il vient :

$$(2.7) U_X(T) = \frac{4 F \cos \phi}{3 \pi r G_{XZ}} \frac{L}{A^2(0)} \left(\frac{1-T}{T(1-T_L)} \right) - \frac{4 F \cos \phi L^3}{\pi r^3 E_Z A^4(0)} \left(\frac{T^3(2T_L-3) + T^2(6-3T_L) - 3T + T_L}{6T^2(1-T_L)^3} \right)$$

A partir de l'expression de la déformée $U_X(T)$ ci-dessus, la valeur prise au point d'application de l'effort est obtenue avec :

$Z=L$, soit $T = T_L$ Il vient :

$$(2.8) U_X(T) = \frac{4 F \cos \phi L^3}{3 \pi E_Z r^3 A^3(0) A(L)} + \frac{4 F \cos \phi L}{3 \pi r G_{XZ} A(0) A(L)}$$

Le premier terme résulte du moment fléchissant, tandis que le second terme est lié à l'effort tranchant T_X

La part relative due à l'effort tranchant est mise en évidence par la présentation suivante :

$$U_X(T) = \frac{4 F \cos \phi}{3 E_Z \pi r^3} \frac{L^3}{A^3(0) A(L)} \left(1 + \frac{r^2 A^2(0) E_Z}{L^2 G_{XZ}} \right)$$

Une application numérique sur le terme $\left(\frac{r^2 A^2(0) E_Z}{L^2 G_{XZ}} \right)$ donne :

$$\frac{r^2 A^2(0) E_Z}{L^2 G_{XZ}} \approx 3,7 \cdot 10^{-3} \lll 1$$

($E_Z=7000\text{MPa}$; $G_{XZ}=270\text{MPa}$; $L = 10\text{m}$; $A(0) = 0,125\text{ m}$; $r=0,96$)

Dans les conditions ci-dessus, la part de flèche due à l'effort tranchant est donc négligeable devant le terme qui résulte du moment fléchissant.

2.1.6. Rigidités locale et globale

2.1.6.1. Définitions

L'expression des déformations longitudinales ε_{zz} explicitée en (2.5) indique que ε_{zz} varie au contour de la section droite, (cf figure 2.4), entre deux extrémums géométriquement opposés, $\lambda=0$ et $\lambda=\pi$, en s'annulant deux fois, en $\lambda=\pm\frac{\pi}{2}$ (direction perpendiculaire à la direction du moment de flexion imposé).

Dans ce qui suit, l'intérêt est porté sur l'endroit de la section où les déformations sont les plus élevées en valeurs absolues, c'est à dire sur les points situés dans le plan de flexion.

Pour une gamme d'efforts F , comprise entre 0 et 2500 Newtons appliquée sur la structure, on mesure d'une part, les déformations correspondantes $\varepsilon_{zz}(-rA(Z),0,Z)$ au niveau d'une section S , et d'autre part, la flèche $U_x(L)$ évaluée au niveau du point d'application des efforts. Deux grandeurs caractéristiques de l'essai sont alors définies :

la **rigidité "locale"**, notée K_l , est définie comme la pente du diagramme donnant le moment fléchissant au niveau de la section droite étudiée, en fonction de la déformation longitudinale mesurée au niveau de cette section, comme représenté sur la figure 2.6

$$(2.9) \quad K_l = \frac{\Delta(F \cos \phi (L-Z))}{\Delta(\varepsilon_{zz})} = \frac{\text{variation du moment appliqué}}{\text{variation de la déformation mesurée}}$$

la **rigidité "globale"**, notée K , est définie comme la pente du diagramme effort, flèche $U_x(L)$, représenté sur la figure 2.6

$$(2.10) \quad K = \frac{\Delta(F \cos \phi)}{\Delta(U_x(L))} = \frac{\text{variation de l'effort appliqué}}{\text{variation de la flèche mesurée}}$$

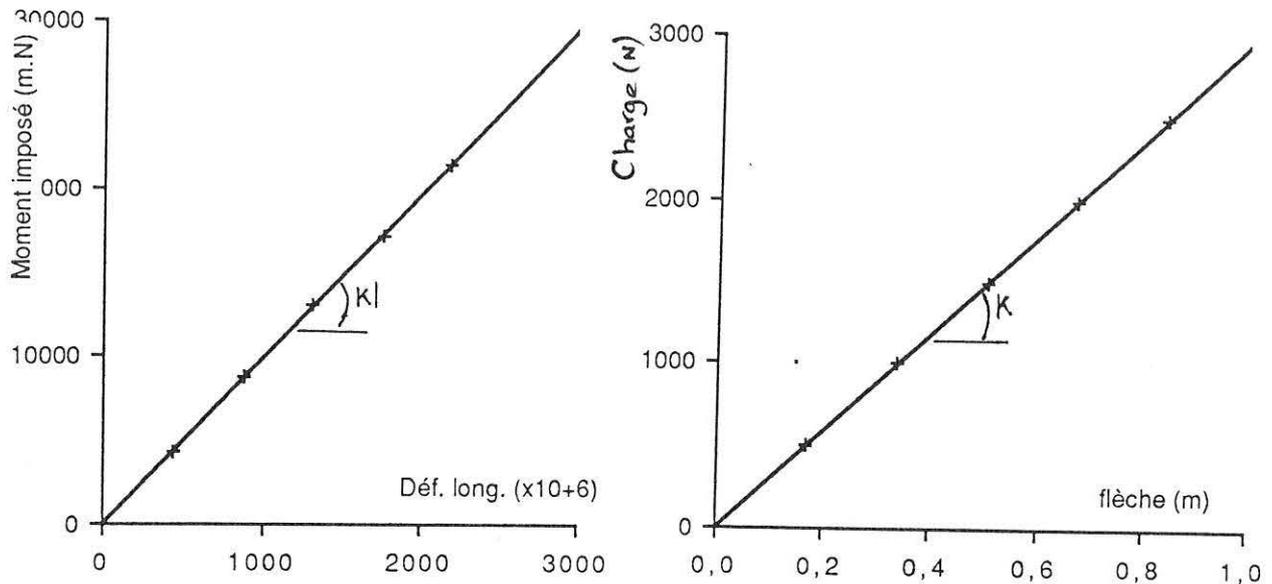


Figure 2.6 : Relations "moment appliqué - déformation longitudinale" et "charge - flèche"

Dans l'exemple ci-dessus la valeur de K est de 2960 N/m et celle de KI est de $10 \cdot 10^6$ m.N.

2.1.6.2. Commentaires sur K et KI.

a) Rigidité locale KI.

KI définie en (2.9), traduit la rigidité locale du matériau bois du tronc et ne prend en compte que les caractéristiques géométriques et élastiques au niveau de la section droite de mesure.

KI ne dépend pas de la conicité du tronc mais plus particulièrement de la forme de la section où elle est évaluée expérimentalement.

Dans la suite, les valeurs mesurées de la rigidité locale KI seront confrontées aux valeurs calculées, à partir des caractéristiques élastiques du bois et géométriques de la section droite en s'appuyant sur la formulation (2.5) qui donne :

$$(2.11) \quad KI = \frac{\Delta(F \cos \phi (L-Z))}{\Delta(\varepsilon_{ZZ})} = \frac{\pi r^2 A^3 E_Z}{4} 10^6$$

b) Rigidité globale K.

K définie en (2.10), traduit la rigidité globale de la structure arbre, et intègre les caractéristiques géométriques et élastiques globales de la tige.

K, calculée sans prendre en compte l'influence de l'effort tranchant T_x , négligeable devant celle du moment fléchissant, dépend de la conicité du tronc et également de la forme de la section comme l'indique son expression : on déduit de la formule (2.8) :

$$(2.12) \quad K = \frac{\Delta(F \cos \phi)}{\Delta(U_x(L))} = \frac{3 E_z \pi r^3 A^3(0) A(L)}{4 L^3}$$

cas particulier d'un fût cylindrique :

Les forestiers mesurent habituellement un diamètre à hauteur d'homme, aussi dans un souci d'allégement de procédure et bien que cette géométrie s'écarte de la géométrie réelle du fût, le cas d'un fût cylindrique est étudié. Dans le cas d'un fût cylindrique, homogène de section droite elliptique, l'égalité suivante : $A(0) = A(L)$, permet de simplifier l'expression de la rigidité globale (2.12) pour donner :

$$K_{cyl.} = \frac{3 E_z \pi r^3 A^4(0)}{4 L^3}$$

$K_{cyl.}$ est alors comparée à la rigidité globale d'un tronc assimilé à un cône $K_{cône}$

$$K_{cyl.} = \frac{3 E_z \pi r^3 A^4(0)}{4 L^3} \quad \text{et} \quad K_{cône} = \frac{3 E_z \pi r^3 A^3(0) A(L)}{4 L^3}$$

les conditions d'essais étant les mêmes, le rapport $\frac{K_{cône}}{K_{cyl.}}$ s'écrit :

$$\begin{aligned} \frac{K_{cône}}{K_{cyl.}} &= \frac{A(L)}{A(0)} \\ \frac{K_{cône}}{K_{cyl.}} &\approx 0,76 \end{aligned}$$

Ce calcul montre donc que le tronc assimilé à un cylindre est plus rigide de 24 % que le tronc assimilé à un cône.

La poutre théorique cylindrique telle qu'est choisie, apparaît comme surdimensionnée par rapport à la réalité : les troncs d'arbres ne sont pas des cylindres s'appuyant sur une section droite elliptique ou circulaire.

2.1.7. Conclusion

L'essai de flexion statique appliqué sur un fût homogène, schématisé géométriquement par un cône ou cylindre à section droite elliptique, permet de mesurer les rigidités globale (K) et locale (KI).

L'effet de l'effort normal est négligeable devant celui du moment fléchissant dans le calcul des déformations longitudinales ε_{zz} , pour les points situés dans le plan de flexion et en périphérie de la section où les déformations sont relevées.

La déformée $U_X(Z)$ est calculée sans l'effet de l'effort tranchant puisqu'il est négligeable devant celui du moment fléchissant. Le schéma décrit ci-dessus, diffère de la réalité car l'effet du poids propre de la structure est négligé et les conditions d'encastrement sont idéalisées (encastrement parfait)(cf. chap.1)

Dans ce qui suit, cette première analyse est modifiée ; différents types d'encastrement sont alors envisagés

2.2. Différents types d'encastements

En réalité, il existe diverses configurations d'encastrement de la structure arbre, liées aux conditions de sols et à la géométrie du système racinaire (cf. chapitre 1)

Dans la démarche qui suit, un encastrement du type "élastique" et un encastrement qualifié de "rigidifiant", tels qu'ils sont définis au § 1.4.2, permettent une évaluation des rigidités globale et locale du tronc.

2.2.1. Modification du problème précédent

Le tronc est toujours assimilé à une poutre droite homogène, verticale, ayant la forme d'un cône à section droite elliptique.

L'expression des composantes du torseur des efforts au niveau d'une section droite est la même que celle indiquée au § 2.1.3

Seule la condition limite relative au comportement de la section de base est modifiée ; ω_0 n'est pas nul, contrairement au cas de l'encastrement rigide développé au § 2.15

L'expression de la déformée (2.8) à la cote $Z=L$ est uniquement modifiée par le terme lié à la rotation de la section droite de base, soit $L\omega_0$.

$$(2.15) \quad U_X(T) = L\omega_0 + \frac{4F\cos\phi L^3}{3\pi r^3 E_Z A^4(0)A(L)} + \frac{4F\cos\phi L}{3\pi r G_{XZ} A^2(0)A(L)}$$

Les deux situations suivantes sont analysées :

- l'encastrement "élastique" n'impose aucun déplacement de la section de base ($Z=0$) du tronc, mais une rotation de celle-ci proportionnelle à l'effort appliqué

$$\omega_0 = p F \cos \phi$$

la flèche à la cote $Z = L$ s'écrit alors :

$$U_X(L) = \left(\frac{1}{K_{(\text{encas.})}} + \frac{1}{K_{(\text{tronc})}} \right) F \cos \phi \quad \text{avec} \quad \frac{1}{K_{(\text{encas.})}} = pL$$

- l'encastrement "rigidifiant" est similaire au précédent si ce n'est qu'au delà d'un certain seuil de rotation, la section de base $S(0)$ ne pivote plus.

$$\omega_0 = p F \cos \phi \quad \text{pour} \quad 0 < \omega_0 \leq \omega_C$$

Ces 2 types d'encastrement sont théoriquement sans influence sur les déformations du tronc au niveau d'une section droite située à une distance Z de la section de base ; par conséquent la rigidité locale KI ne change pas, contrairement à la rigidité globale.

2.2.2. Nouvelle rigidité globale

Une simulation numérique est faite avec les données géométriques utilisées précédemment.

L'encastrement "élastique" est modélisé par une rigidité d'encastrement $p = 10^{-3}$ degré /N

Ce choix est réaliste, une rotation de la section basale de 1° représente 17 centimètres de flèche pour une longueur de 10 mètres.

Dans le cas de l'encastrement "rigidifiant" le seuil au delà duquel la section droite ne pivote plus est fixé arbitrairement à $\omega_C = 1^\circ$.

La rigidité globale est déterminée à partir de la représentation graphique "charge-flèche".

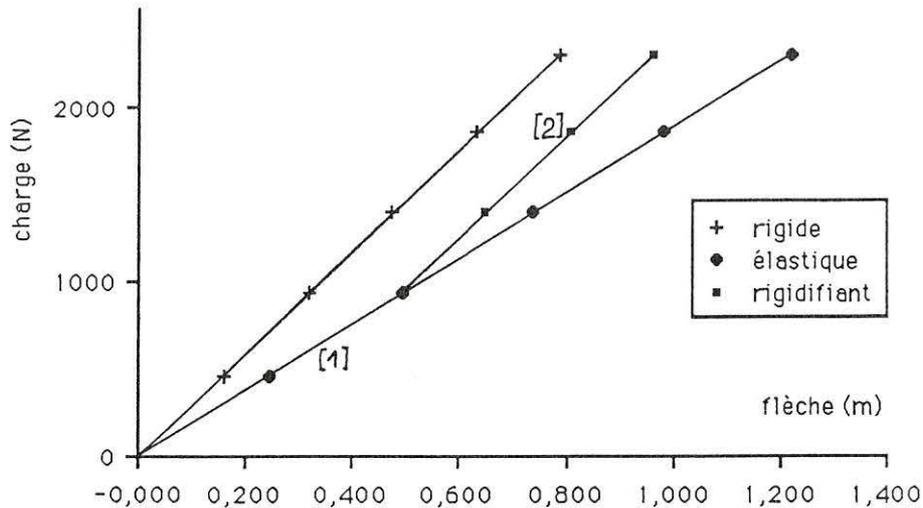


Figure 2.7 : Simulation du diagramme "charge-flèche" pour différents encastremets

2.2.3. Commentaires

Les rhéologues utilisent des éléments mécaniques dont les réponses à des sollicitations sont analogues à celles des matériaux ; par exemple, l'élasticité linéaire est schématisée par le ressort.

L'ensemble "tronc et encastrement rigide" est alors schématisé par un ressort dont la rigidité est la rigidité globale du tronc (figure 2.8-a)

Cette rigidité globale est supérieure à celle calculée avec un encastrement élastique où l'on tient compte d'un pivotement de l'encastrement (arbitrairement proportionnel à l'effort appliqué). Ainsi dans l'application numérique, K passe de 2960 N/m à 1900 N/m soit une diminution de 35% (cf. figure 2.7)

Dans ce cas l'ensemble "tronc et encastrement élastique" est schématisé par 2 ressorts de rigidités différentes, associés en série (figure 2.8-b).

Si $K(\text{tronc})$ et $K(\text{encas.})$ sont les rigidités des 2 éléments de la structure, la rigidité globale K du système est :

$$(2.16) \quad K = \left(\frac{1}{K(\text{encas.})} + \frac{1}{K(\text{tronc})} \right)^{-1} = \frac{K(\text{tronc}) \cdot K(\text{encas.})}{K(\text{tronc}) + K(\text{encas.})}$$

Le scénario de l'encastrement rigidifiant tel qu'on le construit nécessite plus d'explications.

Lors de l'application du moment fléchissant, la structure et l'encastrement, constitué du composite "racine plus terre", subit une rotation vers la direction d'inclinaison de l'arbre ; cela correspond à la phase [1] sur le diagramme "charge-flèche". Tout en se déplaçant le

tronc se déforme puisqu'une partie se trouve être en traction et une autre en compression.

La partie de l'encastrement située dans la direction de flexion est comprimée, alors que la partie opposée est en traction.

Au-delà d'un certain seuil de contrainte, spécifique de l'encastrement, le composite "terre+racine" mis en place, ne bouge plus (ou quasiment plus) alors que le tronc se déplace, tout en continuant à se déformer sous l'effet du moment fléchissant imposé. Cela se traduit par la phase [2] sur le diagramme "charge-flèche", alors que le diagramme "moment-déformation" ne présente aucune discontinuité.

Le diagramme "charge-flèche" traduit dans une première phase le comportement de la structure complète "tronc + encastrement" et dans une seconde phase le déplacement du tronc seul.

L'ensemble "tronc et encastrement rigidifiant" est schématisé par 2 ressorts de rigidités différentes, associés en série ; toutefois l'élément relatif à l'encastrement, est associé à une butée qui schématise un seuil de déplacement de l'encastrement (figure 2.8-c).

Comme précédemment la rigidité globale de l'ensemble, peut s'exprimer à partir des différentes rigidités de chaque élément de la structure. Tant que la butée ne joue pas son rôle, la rigidité globale est liée à la rigidité de l'encastrement et celle du fût. Lorsque le seuil est atteint, seule la partie élastique du tronc est sollicitée . Cela se traduit par un diagramme "charge-déplacement" affine par morceau.

A partir de ce diagramme, deux rigidités globales peuvent être calculées et seule celle relative à la seconde phase est retenue puisque seule la rigidité du fût nous intéresse.



a: encastrement rigide



b: encastrement élastique



c: encastrement rigidifiant

Figure 2.8 : Schématisation des encastresments rigide, élastique et rigidifiant.

Remarque :

Il va de soi, qu'au-delà d'un certain seuil de chargement, spécifique de chaque individu située sur une station donnée, la limite élastique de l'encastrement risque d'être franchie. Pratiquement, cela se traduit par le déracinement partiel ou total de l'arbre.

2.2.4. Conclusion

La rigidité globale est tributaire du comportement de l'encastrement alors que la rigidité locale en est indépendante.

Les encastrements de type "rigide" et "élastique" se distinguent, au niveau du diagramme "charge-flèche", de l'encastrement de type "rigidifiant". Toutefois, à partir d'un diagramme "charge-flèche" linéaire, on ne sait pas distinguer un encastrement de type "élastique" d'un encastrement de type "rigide".

Un encastrement de type "rigidifiant" permet de dissocier le comportement de la structure complète (arbre et enracinement) de celui de la partie aérienne ; comme notre attention porte essentiellement sur le fût, seule la rigidité relative à la tige est retenue.

Afin d'améliorer la schématisation vis à vis de la réalité, l'analyse qui vient d'être présentée est, modifiée dans la suite par la prise en compte du poids situé au dessus du point d'application de l'effort.

2.3. Modélisation avec prise en compte du poids du houppier

En réalité, dans l'état initial, le poids du houppier est a priori excentré par rapport à l'axe vertical \vec{OZ} d'une distance e . Le positionnement réel du centre de masse du houppier pose des difficultés matérielles ; pour la suite de l'analyse, ce centre de masse est supposé, ici, situé dans le plan XOZ.

Dans l'essai de flexion, le poids du houppier subit un excentrement complémentaire et le centre de masse est supposé rester dans le plan XOZ.

Le houppier induit un chargement supplémentaire non souhaité, qui est pris en compte dans la démarche qui suit.

2.3.1. Modification du problème précédent

Cette modification n'affecte pas la géométrie du tronc ; celui-ci est toujours assimilé à une poutre droite homogène, verticale, ayant la forme d'un cône à section droite elliptique (cf figure 1 § 2.1.1)

L'encastrement est choisi "rigide" .

Seule l'expression des composantes du torseur des efforts au niveau d'une section droite est modifiée.

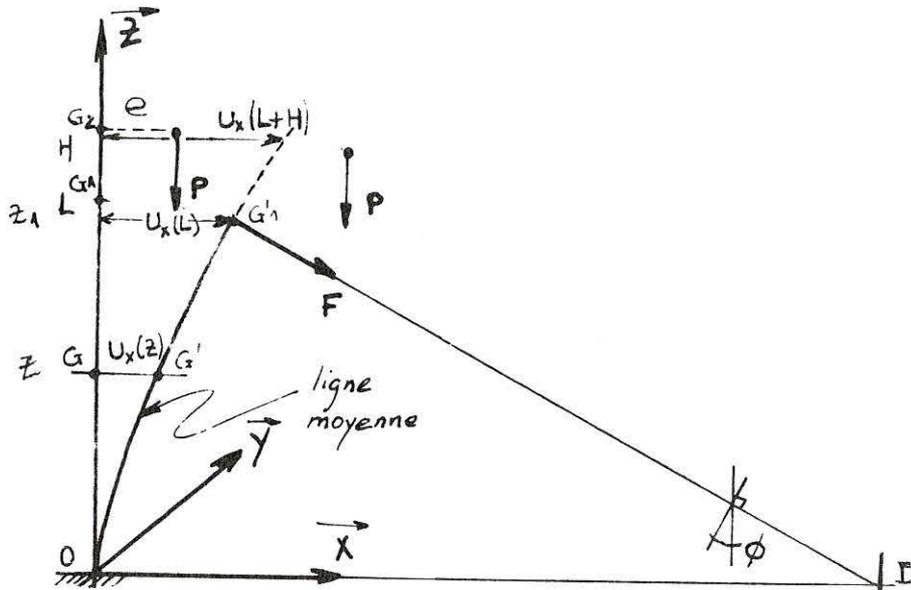


Figure 2.9 : Schéma de principe de flexion statique d'un arbre

Le torseur des efforts sur une section droite $S(Z)$ est modifié par rapport à (2.4)

$$\begin{aligned}
 (2.17) \quad N_Z(Z) &= -(P+F\sin\phi) = -Q & (\|\vec{P}\| = mg) \\
 T_X(Z) &= F\cos\phi \\
 M_Y(Z) &= F\cos\phi(L-Z) + [U_X(L)-U_X(Z)] F\sin\phi + [U_X(L+H)-U_X(Z)] P
 \end{aligned}$$

où : P est le poids de la partie située au dessus de L

H est la cote suivant Z du centre de poussée, comptée par rapport à $Z = L$, au point d'application de l'effort F

l'approximation sur $U_X(L+H)$ est prise sous la forme :

$$(2.18) \quad U_X(L+H) = U_X(L) + \omega_Y(L) \vec{Y} \wedge H\vec{Z} \approx U_X(L) + H \frac{dU_X(L)}{dZ}$$

2.3.2. Calcul de la flèche en tenant compte du poids

En négligeant la contribution de l'effort tranchant, l'équilibre statique d'un tronçon de fût limité par Z et Z+ dZ est, compte tenu de (2.17) et (2.18) :

$$(2.19) \quad E_z \cdot I_Y(Z) \frac{d^2 U_X(Z)}{dZ^2} = M_Y(Z) = F \cos \phi (L-Z) + [U_X(L) - U_X(Z)] Q + H P \frac{dU_X(L)}{dZ}$$

L'équation différentielle du second ordre (2.19), définissant la flèche $U_X(Z)$, est d'une part à coefficients non constants, puisque $I_Y(Z)$ est a priori fonction de Z, et d'autre part, le second membre, dépend de la flèche $U_X(L)$ et de $\frac{dU_X(L)}{dZ}$ résultantes en $Z = L$.

Pour résoudre cette équation, il est pratique d'effectuer le changement de variable utilisé au § 2.1.5, $T = 1 + \frac{\alpha Z}{A(0)}$ soit :

$$\frac{dU_X(L)}{dZ} = \frac{\alpha}{A(0)} \frac{dU_X(T)}{dT}$$

où A_0 est le grand rayon de la section de base en $Z = 0$ et $\alpha = \left(\frac{A(L) - A(0)}{L} \right)$

la conicité définie en (2.1).

Dans ces conditions, l'équation (2.19) se transforme en :

$$(2.20) \quad T^4 \cdot \frac{d^2 U_X(T)}{dT^2} + \gamma^2 U_X(T) = \gamma^2 (a(T-\alpha) + b)$$

$$\text{avec : } \gamma^2 = \frac{Q A^2(0)}{\alpha^2 E_z \cdot I_Y(0)}$$

$$a = - \frac{A(0) F \cos \phi}{\alpha Q}$$

$$b = U_X(T_L) + \frac{\alpha H P}{A(0) Q} \frac{dU_X(T_L)}{dT}(\alpha) + \frac{L \cdot F \cos \phi}{Q}$$

T_L est la valeur de T prise à la cote $Z = H$, soit $T_L = 1 + \frac{\alpha L}{A(0)}$.

Une solution de l'équation différentielle (2.20) est de la forme :

$$U_X(T) = C_1 T \cos\left(\frac{\gamma}{T}\right) + C_2 T \sin\left(\frac{\gamma}{T}\right) + (a(T-\alpha) + b)$$

$$\text{avec } \frac{dU_X(T)}{dT} = C_1 \left(\cos\left(\frac{\gamma}{T}\right) + \frac{\gamma}{T} \sin\left(\frac{\gamma}{T}\right) \right) + C_2 \left(\sin\left(\frac{\gamma}{T}\right) - \frac{\gamma}{T} \cos\left(\frac{\gamma}{T}\right) \right) + a$$

L'identification des quatre termes $C1$, $C2$, $U_X(T_L)$ et $\frac{dU_X}{dT}(T_L)$ par les conditions aux limites, va permettre de dégager la solution.

En $Z = 0$, la flèche à l'encastrement est nulle : $T=1$ et $U_X(1) = 0$

$$(2.22) \quad C1.\cos \gamma + C2.\sin \gamma + b = 0$$

et la dérivée de la flèche est nulle : $T=1$ et $\frac{dU_X}{dT}(1) = 0$

$$(2.23) \quad C1.(\cos \gamma + \gamma.\sin \gamma) + C2(\sin \gamma - \gamma \cos \gamma) + a = 0$$

En $Z = L$, $T=T_L = 1 + \frac{\alpha L}{A(0)}$, la flèche vaut $U_X(T_L)$

$$(2.24) \quad C1.T_L.\cos\left(\frac{\gamma}{T_L}\right) + C2.T_L.\sin\left(\frac{\gamma}{T_L}\right) + a(T_L-1) + b - U_X(T_L) = 0$$

et la dérivée vaut : $\frac{dU_X}{dT}(T_L)$ soit

$$(2.25) \quad C1\left(\cos\left(\frac{\gamma}{T_L}\right) + \frac{\gamma}{T_L} \sin\left(\frac{\gamma}{T_L}\right)\right) + C2\left(\sin\left(\frac{\gamma}{T_L}\right) - \frac{\gamma}{T_L} \cos\left(\frac{\gamma}{T_L}\right)\right) + a - \frac{dU_X}{dT}(T_L) = 0$$

Les équations (2.22), (2.23), (2.24), (2.25) donnent accès aux quatre termes $C1$, $C2$, $U_X(T_L)$ et $\frac{dU_X}{dT}(T_L)$.

$$C1 = \frac{A(0).F\cos\phi}{\alpha Q \Delta} \left(\frac{A(0)Q}{\alpha HP} T_L \sin\left(\frac{\gamma}{T_L}\right) + \sin\left(\frac{\gamma}{T_L}\right) - \left(\frac{\gamma}{T_L}\right) \cos\left(\frac{\gamma}{T_L}\right) - \sin\gamma + \gamma \cos\gamma \right)$$

$$C2 = \frac{A(0).F\cos\phi}{\alpha Q \Delta} \left(-\frac{A(0)Q}{\alpha HP} T_L \cos\left(\frac{\gamma}{T_L}\right) - \cos\left(\frac{\gamma}{T_L}\right) - \left(\frac{\gamma}{T_L}\right) \sin\left(\frac{\gamma}{T_L}\right) + \cos\gamma + \gamma.\sin\gamma \right)$$

avec

$$(2.26) \quad \Delta = \sin\left(\frac{\gamma}{T_L} - \gamma\right) \left(1 + \frac{\gamma^2}{T_L} + \frac{A(0)Q}{\alpha HP} T_L \right) + \gamma \cos\left(\frac{\gamma}{T_L} - \gamma\right) \left(1 - \frac{1}{T_L} + \frac{A(0)Q}{\alpha HP} T_L \right)$$

L'expression de la flèche $U_X(T_L)$ est :

$$(2.27) U_X(T_L) = - \frac{L.F \cos \phi}{Q} \left(1 + \frac{\gamma^2 E Z I_Y(0) T_L}{L H P \Delta} \sin \left(\frac{\gamma}{T_L} - \gamma \right) \right) + \frac{A(0)}{\alpha L \Delta} \left(2\gamma + (1 - T_L) \sin \left(\frac{\gamma}{T_L} - \gamma \right) - \left(T_L \gamma + \frac{\gamma}{T_L} \right) \cos \left(\frac{\gamma}{T_L} - \gamma \right) \right)$$

où Δ est défini en (2.26)

$$(2.28) \frac{\alpha}{A(0)} \frac{dU_X}{dT} (T_L) = \frac{dU_X}{dZ} (L) = \frac{F \cos \phi}{Q} \left(1 - \frac{A(0) Q T_L}{\alpha H P \Delta} \left(- \frac{\gamma}{T_L} + \sin \left(\frac{\gamma}{T_L} - \gamma \right) + \gamma \cos \left(\frac{\gamma}{T_L} - \gamma \right) \right) \right)$$

Bien que l'expression générale de la déformée se présente sous une forme explicite, les différents termes seront calculés à partir d'un programme informatique facilitant ainsi le travail.

2.3.3. Expression des déformations

En suivant une démarche analogue à celle suivie au § 2.1.4., le calcul des déformations longitudinales, transverses et de cisaillement est proposé. Des applications numériques réalisées à partir des mêmes données montrent que certains termes peuvent être négligés.

2.3.3.1 Déformations longitudinales et transverses

A partir des définitions données au § 1.3.2.3, et pour les mêmes raisons que celles présentées en 2.1.4.1, pour un point C ($C(X,Y,Z) = (rA \cos \lambda, A \sin \lambda, Z)$) situé sur le contour de la section S (figure 2.4) l'expression des déformations est :

$$\varepsilon_{ZZ}(X,Y,Z) = \frac{1}{E_z} \left(\frac{-Q}{\pi r A^2} - \frac{M_Y}{\pi r^2 A^3} \cos \lambda \right)$$

Pour les points situés dans le plan neutre ($\lambda = \pm \frac{\pi}{2}$), l'expression des déformations devient :

$$\varepsilon_{ZZ}(X,Y,Z) = \frac{1}{E_z} \left(\frac{-Q}{\pi r A^2} \right)$$

Pour les points situés dans le plan de flexion ($\lambda=0$ et $\lambda=\pi$), on a :

$$(2.29) \quad \varepsilon_{ZZ}(X,Y,Z) = \frac{1}{E_z} \left(\frac{-Q}{\pi r A^2} - \frac{M_Y}{\pi r^2 A^3} \right)$$

L'expression (2.29) qui peut se mettre sous la forme :

$$\varepsilon_{ZZ}(X,Y,Z) = - \frac{4M_Y}{E_z \pi r^2 A^3} \left(1 + \frac{r A Q}{4M_Y} \right)$$

permet de montrer que le terme lié à l'effort normal $\left(\frac{r A Q}{4M_Y} \right)$ est relativement faible devant l'unité ; en effet, une application numérique pour une section située à la cote $Z=1$ m. ($A(X,Y,1)= 0,122$ m, $r=0,96$, $E=7000$ MPa, $Z=1$ m, $F = 1000$ N, $\phi = 20^\circ$, $L =10$ m, $P =2500$ N , $H= 0$ m) donne :

$$\left(\frac{r A Q}{4M_Y} \right) = 8,8 \cdot 10^{-3} \ll 1$$

Les points du plan de flexion situés en périphérie de la section S se déforment essentiellement sous l'effet du moment fléchissant appliqué sur le fût : $\varepsilon_{ZZ}(+rA,0,Z) = -1030 \cdot 10^{-6}$ dans notre exemple.

Les points situés sur le plan neutre se déforment uniquement sous l'effet de compression de l'effort normal ($\lambda = +\frac{\pi}{2}$, $\varepsilon_{ZZ}(0,A,Z) = -9 \cdot 10^{-6}$), Pratiquement , il est possible de mesurer une telle valeur, mais elle reste dans le domaine de l'incertitude expérimentale.

Ce résultat est à rapprocher de ceux de Martley (1928), qui montre que les déformations ε_{ZZ} liées au poids propre de l'arbre qui augmente chaque année du fait de la croissance, sont de l'ordre de la dizaine de microdéformation (Il montrait par ce calcul que le poids propre de l'arbre ne pouvait être à l'origine des déformations importantes que l'on mesure en périphérie d'un tronc lors de la libération des contraintes internes (de l'ordre de $1000 \cdot 10^{-6}$)(voir § 1.5.2)

Par rapport au premier cas de figure (cône sans le poids du houppier), l'augmentation du moment fléchissant liée à l'effet additif du poids du houppier, se traduit par une augmentation des déformations

longitudinales $\varepsilon_{ZZ}(Z)$ enregistrées au niveau d'une section droite : elles passent de -920.10^{-6} à 1030.10^{-6} .

Les déformations transverses, associées à ces efforts, se déduisent quant à elles, des égalités suivantes :

$$\varepsilon_{XX} = \varepsilon_{YY} = -\nu_{XZ} \varepsilon_{ZZ}$$

2.3.3.2. Déformations de cisaillement

L'expression de l'effort tranchant étant la même que dans la configuration initiale, les déformations de cisaillement restent inchangées ; leurs expressions conformément aux § 1.3.1.4. sont :

$$2 \varepsilon_{XZ}(X,Y,Z) = \frac{1}{G_{XZ}} \sigma_{XZ}(X,Y,Z)$$

où les contraintes $\sigma_{XZ}(Z)$ s'expriment (cf § 1.4.3) de la façon suivante :

$$\sigma_{XZ}(X,Y,Z) = \frac{4}{3} \frac{T_X}{S} \left(1 - \frac{X^2}{(rA(Z))^2} \right)$$

Les commentaires du § 2.1.4.2 ne sont en rien modifiés.

2.3.4. Nouvelles rigidités locale et globale, prenant en compte le poids

Une simulation numérique, réalisée avec les données géométriques précédentes et des nouvelles données, concernant le poids et la position du centre de masse du houppier, permet de représenter de nouveaux graphiques "charge-flèche" et "moment-déformation".

rigidité locale

Avec des valeurs de poids et de hauteur de centre de masse réalistes, la description des courbes est linéaire, ce qui permet de déterminer une nouvelle rigidité locale de la structure. La définition de la rigidité locale exprimée par (2.9) reste inchangée.

$$KI = \frac{\Delta(F \cos \phi (L-Z))}{\Delta(\varepsilon_{ZZ})}$$

Toutefois, l'expression de ε_{ZZ} prends en compte ici, le poids du houppier :

$$\varepsilon_{ZZ} = \frac{(M_{imp.} + M_{poids}) X}{E_Z I_Y(Z)}$$

Par rapport à la modélisation précédente (cône sans poids), la rigidité locale KIP obtenue ici, diffère d'un terme égal au rapport des moments fléchissants ; $KIP = KI \left(\frac{M_{imp.}}{M_{imp.} + M_{poids}} \right)$

La rigidité locale trouvée dans ce cas, sera inférieure à la rigidité locale trouvée sans prendre en compte le poids du houppier, puisque le rapport des moments fléchissant est inférieure à 1.

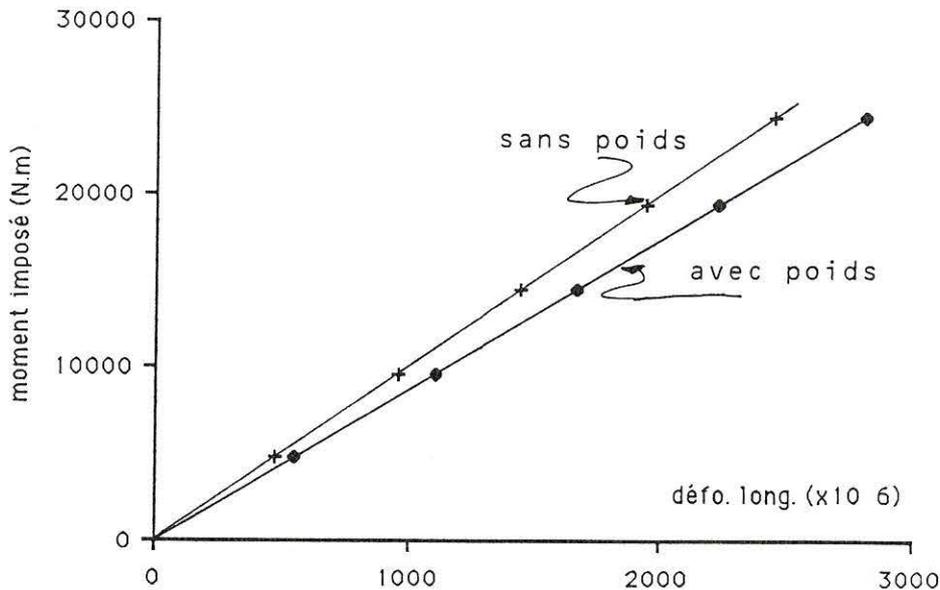


Figure 2.10 : Rigidités locales calculées avec et sans le poids du houppier

La rigidité locale KI d'une section droite située à hauteur d'homme passe de $10,0 \cdot 10^6$ N.m sans prendre en compte le poids à $8,7 \cdot 10^6$ N.m avec un poids situé au niveau du point d'application de l'effort, soit une diminution de 13% (Cf figure 2.10)

rigidité globale

En revenant à la définition (2.10) de la rigidité globale K , elle est évaluée, en tenant compte du poids, à partir de (2.27)

$$K^P = \frac{\Delta(F \cos \phi)}{\Delta(U_X(L))} = -\frac{Q}{L} \left[1 + \frac{\gamma^2 E_Z I_Y(0) T_L}{L H P \Delta} \sin \left(\frac{\gamma}{T_L} - \gamma \right) + \frac{A(0)}{\alpha L \Delta} \left(2\gamma + (1 - T_L) \sin \left(\frac{\gamma}{T_L} - \gamma \right) - (T_L \gamma + \frac{\gamma}{T_L}) \cos \left(\frac{\gamma}{T_L} - \gamma \right) \right) \right]$$

avec
$$\gamma^2 = \frac{Q A^2(0)}{\alpha^2 E_Z \cdot I_Y(0)}$$

$$T_L = 1 + \frac{\alpha L}{A(0)}$$

$$H\Delta = \sin\left(\frac{\gamma}{T_L} - \gamma\right) \left(H\left(1 + \frac{\gamma^2}{T_L}\right) + \frac{A(0)Q}{\alpha P} T_L \right) + \gamma \cos\left(\frac{\gamma}{T_L} - \gamma\right) \left(H\left(1 - \frac{1}{T_L}\right) + \frac{A(0)Q}{\alpha P} T_L \right)$$

L'évaluation pratique de H, distance du centre de poussée du poids de la partie supérieure au point d'application de l'effort, est difficile. Une première simplification, consiste à admettre que le centre de poussée est très voisin de la mi-hauteur de l'arbre, endroit où précisément l'effort est appliqué ; posons alors $H = 0$ il vient :

$$H\Delta = \left(\sin\left(\frac{\gamma}{T_L} - \gamma\right) + \gamma \cos\left(\frac{\gamma}{T_L} - \gamma\right) \right) \frac{A(0)Q}{\alpha P} T_L$$

et la formule (2.29) se réduit à :

$$K^P = \frac{\Delta(F\cos\phi)}{\Delta(U_X(L))} = -\frac{Q}{L} \left(1 + \frac{1}{T_L - 1} \frac{\sin\left(\frac{\gamma}{T_L} - \gamma\right)}{\left(\sin\left(\frac{\gamma}{T_L} - \gamma\right) + \gamma \cos\left(\frac{\gamma}{T_L} - \gamma\right) \right)} \right)^{-1}$$

De plus, nous proposons une vérification de l'expression de la flèche $U_X(T_L)$ (2.27) ; dans l'hypothèse où γ est faible, c'est à dire lorsque $Q \rightarrow 0$, en procédant à un développement limité avec $\gamma \rightarrow 0$, l'expression de la flèche $U_X(T_L)$ devient :

$$U_X(T_L) = \frac{L.F\cos\phi}{Q} \frac{\gamma^2 T_L}{3} \left(\frac{1 - T_L}{T_L} \right)^2$$

comme $T_L = 1 + \frac{\alpha L}{A(0)}$ et $\gamma^2 = \frac{Q A^2(0)}{\alpha^2 E_Z \cdot I_Y(0)}$

$$U_X(T_L) = \frac{4 L^3 F \cos\phi}{3 \pi E_Z r^3 A^3(0) A(L)} \left(1 + \frac{4 L^2 Q}{\pi E_Z r^3 A(0) A^3(L)} \left(1 + \frac{16 A(L)}{15 A(0)} \right) \right)$$

L'expression ci-dessus, est satisfaisante dans la mesure où l'on retrouve, au premier ordre, l'expression de la flèche trouvée au §2.1.5 (cas du cône sans le poids). Le terme entre crochets qui s'ajoute à l'unité, est un facteur correctif lié à la prise en compte d'un faible poids.

La figure 2.11 ci dessous met en évidence la différence de rigidité globale d'une poutre chargée ou non d'un poids.

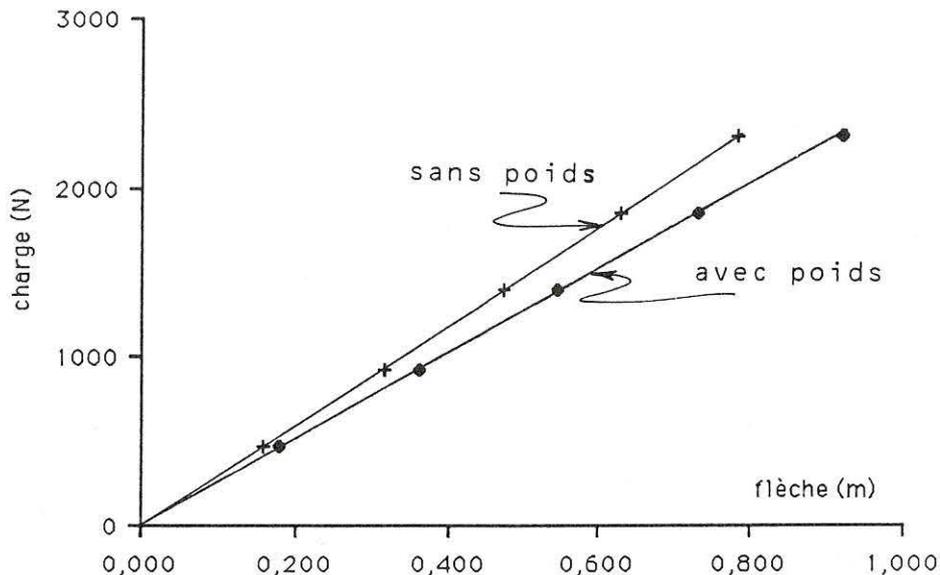


Figure 2.11 : Rigidités globales calculées avec et sans le poids du houppier

La rigidité globale apparente diminue par rapport à celle obtenue sans prendre en compte le poids.

En positionnant le centre de masse du houppier à la même cote ($Z=L$) que le point d'application de l'effort, la rigidité globale K^P est de 2650 N/m soit une diminution de 11% par rapport à K calculée sans prendre en compte ce poids ($K=2960$ N/m). Cette diminution est d'autant plus marquée que le centre de masse du houppier s'éloigne du point d'application de l'effort appliqué.

L'encastrement choisi pour l'analyse de l'effet du poids était de type rigide. Un encastrement "élastique" associé à l'effet du poids minimiserait davantage la rigidité globale K , puisque à charge appliquée égale, le pivotement de l'encastrement ajoute un déplacement supplémentaire à celui résultant du poids.

Lorsque les valeurs de P et H sont peu réalistes (ou exceptionnelles), des situations critiques pour la structure, sont atteintes (cf figure 2.12) ; de telles situations se rencontrent lorsque de la neige (ou de la glace s'accumule sur le houppier. Si ce dernier est excentré, le chargement entraîne un moment fléchissant, l'arbre s'écarte de sa position d'équilibre, jusqu'à atteindre parfois, la rupture de la tige.

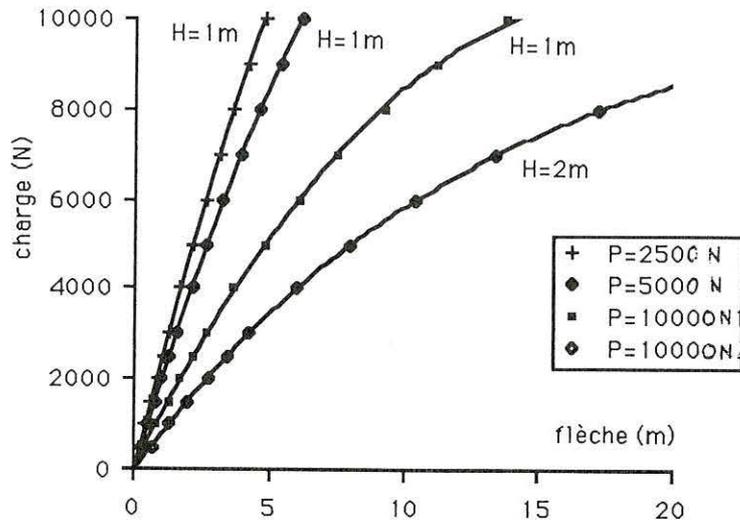


Figure 2.12 : Simulation de différents poids du houppier situés à H=1m et H=2m

2.4. Conclusion

La géométrie du tronc, qui peut être de description analytique complexe, est simplifiée pour être assimilée à une poutre droite.

Ces simplifications géométriques associées aux hypothèses faites sur le matériau bois du tronc, alors considéré comme isotrope transverse, permettent d'appliquer la "théorie des poutres" sur cette structure.

Un essai de flexion statique appliqué au tronc assimilé à une poutre homogène droite, verticale, permet de déterminer une rigidité locale K_l en périphérie d'une section droite du tronc, et une rigidité globale K de la structure.

Ces rigidités K et K_l dépendent de la géométrie du tronc, notamment son inertie, du module E_L du matériau, des conditions d'encastrement et de chargement imposé.

Pour s'approcher d'une configuration réaliste, la prise en compte du poids de la structure située au dessus du point d'application de la charge imposée, tout en compliquant l'écriture du problème modifie de façon significative les rigidités globale et locale théoriques.

Lors de la flexion de la structure, l'effet du poids du houppier, vient s'ajouter au moment de flexion imposé, les rigidités globale K^P et locale K_l^P calculées sont inférieures aux rigidités K et K_l obtenues sur la poutre analogue non chargée par le poids, les conditions d'encastrement étant similaires.

La rigidité globale (respectivement locale) donne accès, au module d'élasticité longitudinale moyen du fût (respectivement au module d'élasticité de la section droite). L'analyse des résultats expérimentaux se fera en terme de rigidité (globale et locale) mais également en terme de modules d'élasticité.

Le chapitre qui suit, présente la phase expérimentale nécessaire à la validation de l'analyse du chapitre 2.

Chapitre 3

Expérimentation en laboratoire et sur le terrain

L'analyse théorique présentée au chapitre précédent, montre qu'il faut connaître certains paramètres géométriques de la structure, afin de déterminer le module d'élasticité longitudinal du matériau sous des conditions de chargement données.

L'objectif de ce chapitre est de présenter la phase expérimentale pour la comparer à l'analyse théorique.

Après avoir choisi des arbres à solliciter, les données géométriques qui relèvent de la dendrométrie classique ainsi que des relevés spécifiques à l'étude sont présentés.

Le dimensionnement de l'essai de flexion est explicité ainsi que le protocole de mesure de déplacement du point d'application de l'effort. Une approche préalable, en laboratoire, de la technique extensométrique classique, permet, tout en se familiarisant avec le matériel, d'établir un protocole adapté aux conditions particulières de terrain.

Les mesures des données nécessaires telles que l'humidité et l'infradensité, font l'objet de protocoles spécifiques qui sont décrits.

3.1. Présentation des arbres étudiés

Les arbres utilisés sont différents hybrides de "Peupliers" d'origine et de traitement sylvicole connus. Pour des raisons pratiques, nous avons également choisi des arbres situés à proximité du laboratoire (5 km).

Les caractéristiques du peuplement et de la station figurent en annexe 1.

Une douzaine d'arbres sont retenus en fonction de leur aspect général.

Ces derniers se répartissent comme suit :

- le plus droit et le plus vertical possible (n°7, n°8)
- le plus droit possible mais incliné (n°3, n°5, n°6, n°9, n°10, n°12)
- flexueux (n°1, n°2, n°4, n°11)

Comme ces arbres ont fait l'objet d'une étude de variabilité de quelques caractéristiques physiques (infradensité, retrait), ils sont également choisis, afin de couvrir une gamme d'infradensité la plus large possible. Parmi les individus disponibles, l'infradensité varie de 270 g/cm³ à

440 g/cm³. Enfin, bien que les arbres soient du même âge (30-31 ans) et sur la même station, ils se distinguent par leurs dimensions.

3.2. Mesures dendrométriques

3.2.1. Mesures classiques

Pour chaque arbre retenu, les relevés dendrométriques suivants sont effectués :

- circonférence à 1,3 mètre avec un ruban souple gradué en centimètres,
- hauteur totale avec un dendromètre "Blum Leiss" gradué en mètres,
- hauteur de la base du houppier (1^{ère} grosse branche verte) avec le même instrument que précédemment,
- critère d'inclinaison défini comme la plus grande distance (d) entre une verticale matérialisée par un fil à plomb de longueur (l) et le tronc de l'arbre ; d est mesurée à 1,3 mètre avec un réglet gradué en centimètres. L'angle (α) peut être quantifié tel que $\text{tg}(\alpha) = \frac{d}{l}$. (Bien que les valeurs de α soient de l'ordre de quelques degrés, cela suffit pour qualifier un arbre de "penché")

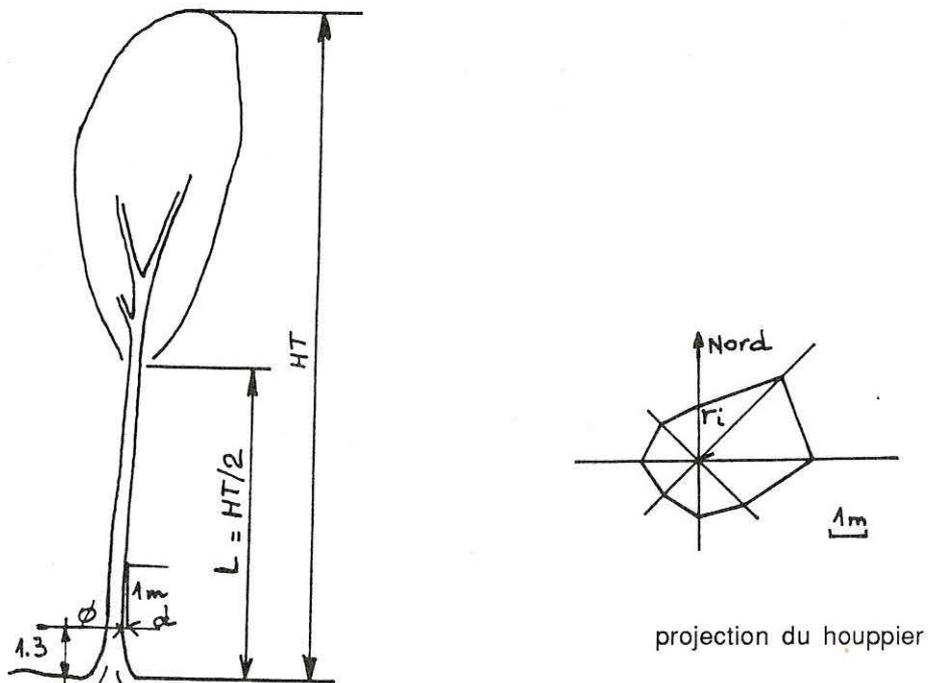


Figure 3.1 : Relevés dendrométriques

3.2.2. Mesures spécifiques

Pour le besoin de l'étude, d'autres mesures dendrométriques s'avèrent nécessaires ; certaines sont réalisées lorsque l'arbre est sur pied alors que d'autres sont exécutées une fois l'arbre abattu, tels :

-la circonférence à différentes hauteurs (tous les 2,5 mètres à partir de la base située près du sol),

-8 rayons projetés du houppier relevés avec une équerre optique, mesurés au décimètre gradué en centimètres,

Ces 8 rayons espacés d'un angle de 45° permet de calculer une

surface (SP) dans le plan H de repère (O, \vec{N}, \vec{W}) . La surface (SP) est évaluée par la surface du polygone formé par les 8 rayons :

$$SP = \frac{\pi}{8} \sum_{i=1}^8 (r_i)^2 \quad r_i : \text{longueur du rayon } i$$

A ces mesures géométriques, il faut ajouter des mesures de biomasse :

- pesée de la tige découpée en billons de 2,5 mètres ; les branches avec les feuilles sont pesées séparément des billons avec une balance précise au 0,1 kilogramme ,

- prélèvement sur la partie inférieure de chaque billon (gros diamètre) d'un disque de 4 à 5 centimètres d'épaisseur ; après découpe elle est transportée au laboratoire, sous sachet plastique, pour y déterminer son humidité selon la méthode habituelle. La moyenne des humidités mesurées sur ces disques, est supposée représenter une humidité moyenne de l'arbre.

Cette opération permet de comparer la masse anhydre moyenne des arbres étudiés avec celle donnée par des modèles prévisionnels issus de la littérature (Telfer,1969, Ruark et al.,1987)

Sur la bille de pied (premier billon de 2,5 mètres), on fait des relevés sous écorce, des diamètres, là où les mesures de déformations sont réalisées (voir § 3.4.2)

3.2.3. Exemple de relevés et commentaires sur les données dendrométriques

Pour préciser les notations et les unités adoptées, les relevés dendrométriques et de biomasses réalisés sur un arbre sont présentés comme suit :

N° arbre : 1

Hauteur totale (HT) : 27,00 m

Hauteur de la base du houppier (HH) : 13,50 m

Circonférence au niveau du sol (Circ_{sol}) : 1,11m

Circonférence à 1,3 (Circ_{1,30}) : 0,93 m

Circonférence à mi-hauteur (Circ_{0,5 HT}) : 0,67 m

Diamètre direction 1-3 à 1,3 mètre ($D_{1,30}^{1-3}$) : 0,264 m

Diamètre direction 2-4 à 1,3 mètre ($D_{1,30}^{2-4}$) : 0,268 m

Critère d'inclinaison (incli) : $\frac{l}{d} = 0,065 = \text{tg}\alpha$ ($\alpha = 3,5^\circ$)

Masse totale humide(MT) (fût+branches+feuilles) : 820 kg

Masse de la moitié supérieure de l'arbre (M>L) : 310 kg

Surface projetée du houppier (SH) : 35,0 m²

Les relevés concernant les autres arbres figures en annexe 9.

commentaire sur la géométrie :

Les arbres utilisés pour les expériences, bien qu'ayant quasiment le même âge (30-31 ans), présentent une disparité géométrique intéressante. En effet, la circonférence à hauteur d'homme s'échelonne de 0,7 à 1,09 mètre, alors que la hauteur totale varie de 23,0 à 28,1 mètres.

Les relevés de circonférence tous les 2,5 mètres, (pour la partie de la tige qui nous intéresse) permettent d'accéder au défilement de l'arbre. On remarque (figure 3.2) la partie plus large de la base, liée à l'empatement de l'arbre. Au-dessus de 1,30 mètre, la décroissance apparaît comme relativement régulière jusqu'à la zone de branchaison. La figure 3.2 ne présente pas une conicité réaliste de la partie située en dessous de 1,30 mètre. Ceci est liée au manque de relevés entre le sol et cette hauteur.

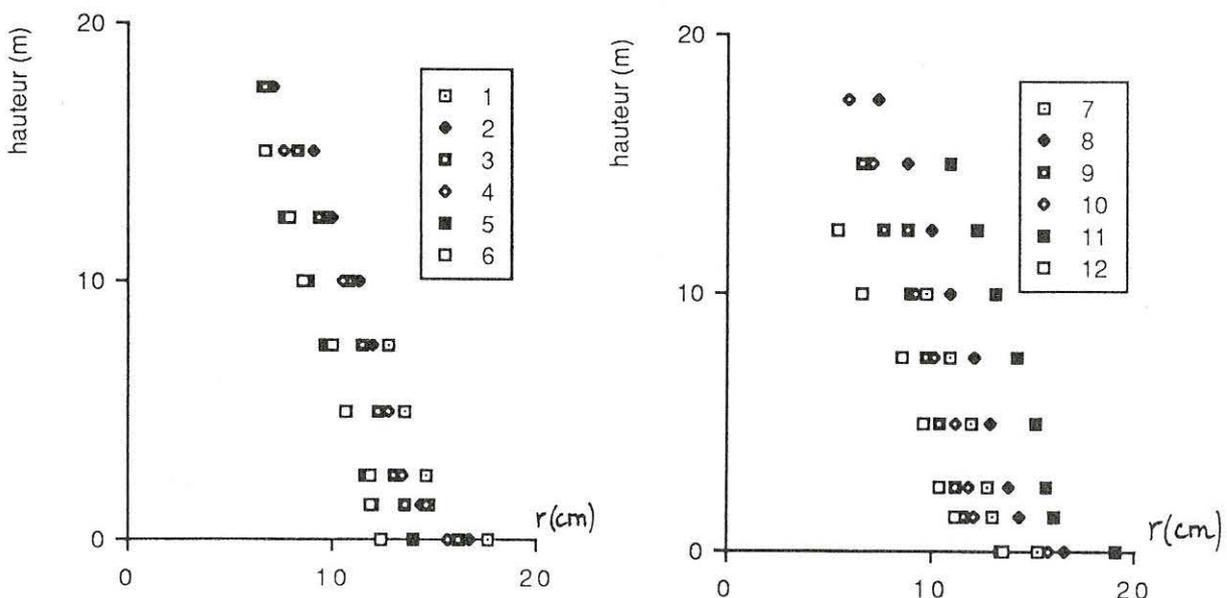


Figure 3.2 : Relation entre rayon et hauteur de tige (arbres 1 à 12)

commentaire sur la masse des arbres

La masse totale des arbres se situe dans un rapport de 1 à 2,2 : la masse minimum étant de 425 kg alors que la masse maximum est de 950 kg. La pesée de l'arbre tronçonné en billon de même longueur (2,5 mètres) permet de représenter pour chaque individu la relation entre l'incrément de masse et la hauteur. (figure 3.3-a)

La figure 3.3-a met en évidence la cote du centre de masse de la partie aérienne de l'arbre ; ce centre est situé entre 30 et 40 % de la hauteur totale des arbres étudiés ; bien que ces observations concernent des "Peupliers", les résultats sont similaires à ceux trouvés par Adamovitch (op.cit) sur des résineux canadiens.

Enfin, dans nos essais, la masse située au dessus du point d'application de l'effort représente de 35% à 45% de la masse totale de l'arbre (sans les racines) (figure 3.3-b).

La position du centre de masse du houppier n'est pas accessible à partir des seules mesures de pesées, du fait de la distribution spatiale des branches.

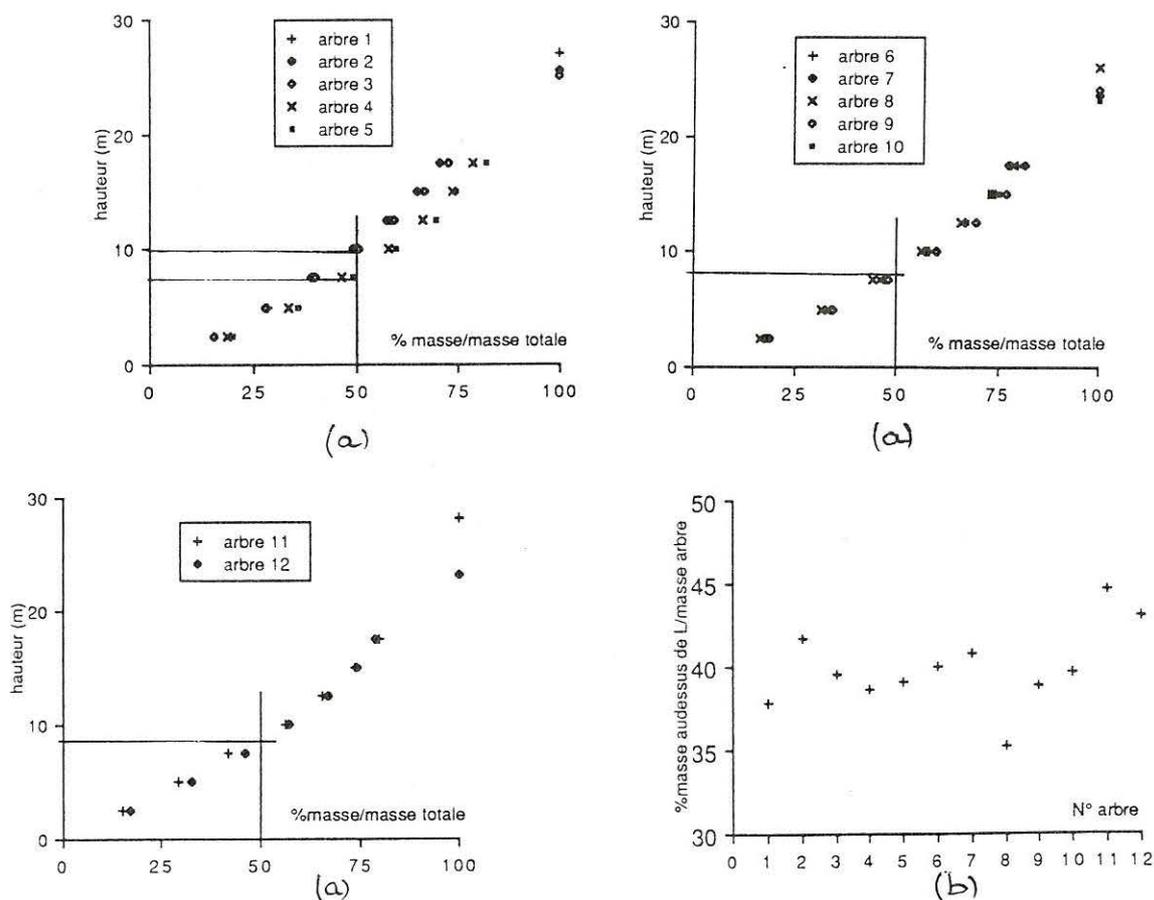


Figure 3.3.a : Relation %masse/masse totale et hauteur

b: % de la masse située au dessus de L

Un commentaire sur l'humidité des arbres figure au paragraphe 3.6.2

3.3. Application d'un chargement, mesure d'une flèche

3.3.1. Choix d'une gamme d'efforts et de la hauteur d'application

Il s'agit de trouver quelle gamme d'efforts est applicable sur la tige et à quelle hauteur ; ceci sans endommager l'arbre, puisque l'essai se veut non destructif.

En premier lieu, l'observation des déplacements enregistrés par ces arbres sollicités par le vent, indique que des flèches de l'ordre de 1 à 2 mètres au niveau du sommet sont réalistes (sans endommagement apparent de la structure) .

L'analyse portant essentiellement sur les caractéristiques élastiques du fût, il s'agit de solliciter cette partie de l'arbre, ou tout au moins la plus grande partie possible.

Toutefois, la hauteur (L) choisie, ne doit pas dépasser un seuil au delà duquel la structure risque d'adopter le comportement particulier où la cime peut fléchir sans pour autant que le tronc fléchisse de façon significative. Cette flexion de cime peut entraîner des relevés de flèches erronés et/ou un endommagement de la structure.

Contrairement à cette configuration, si le point d'ancrage est situé relativement bas, l'effort appliqué peut atteindre un seuil qui entraîne l'endommagement de l'arbre et de l'enracinement sans pour autant que la flèche soit significative.

Compte tenu des ces éléments, le point d'application de l'effort est situé à la mi-hauteur de l'arbre, soit $L = HT/2$. En cas de présence d'une grosse branche ou d'une fourche située en dessous de cette hauteur, l'ancrage est situé en dessous de la ramification.

Par ailleurs, des essais préliminaires montrent que les efforts appliqués peuvent atteindre 1500 N, sans que les arbres sollicités ne soient endommagés. Par conséquent, par sécurité, la gamme d'efforts choisie, s'échellonne de 300 à 1100 newtons.

3.3.2. Déroutement de l'essai

Afin d'éviter des effets supplémentaires qui ne sont pas abordés dans cette étude, l'essai est réalisé en l'absence totale de vent.

Un câble d'acier toroné de diamètre 8 millimètres fixé à mi-hauteur de l'arbre à solliciter est relié à un treuil manuel de type "tirefort" d'une capacité maximum de 500 kilogrammes, lui même attaché à un dynamomètre préalablement étalonné (pour l'arbre n° 11, le point d'ancrage est situé plus bas que la mi-hauteur du fait de la présence d'une ramification importante à ce niveau) ; l'ensemble étant fixé à la base d'un arbre situé à une distance comprise entre 20 et 30 mètres. Aux points d'attache, les câbles sont disposés de manière à ne pas blesser les deux arbres, et à éviter qu'ils ne glissent lors du chargement.

L'expérience a porté sur douze arbres :

2 arbres (n° 11 et 12) sont fléchis suivant deux directions orthogonales avec une accommodation préalable.

3 arbres (n° 1,6 et 7) sont fléchis suivant trois directions en quadrature.

7 arbres (n° 2, 3, 4, 5, 8, 9 et 10) suivant quatre directions en quadrature. La première direction de flexion est arbitrairement choisie comme la direction d'inclinaison de l'arbre. Les autres directions sont obtenues en tournant d'un angle de 90° dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, tant que l'on peut trouver un point d'ancrage.

Si l'arbre est relativement peu incliné, la première direction est choisie en fonction de la présence de particularité du tronc, par exemple une ovalité de section marquée. Un des plans de flexion est alors situé dans l'axe de cette particularité.

Tous les arbres sont sollicités suivant chaque direction, deux fois consécutivement en respectant le protocole suivant :

- application de la gamme d'efforts (F) à l'aide de l'ensemble "treuil + dynamomètre" (F = 300, 500, 700, 900, 1100 Newtons)
- pour chaque valeur d'effort, la longueur de câble treuillée (l) est mesurée au ruban souple. Elle correspond au déplacement du point d'application de l'effort.
- le relevé de l'angle (ϕ) entre le câble et une horizontale, à l'aide d'un rapporteur et d'un fil à plomb, donne accès aux composantes verticale et horizontale de l'effort appliqué

Après ce cycle de chargement, l'effort est relâché totalement jusqu'à ce que l'arbre ne bouge plus, alors il est à nouveau fléchi de la même façon que précédemment. Les deux essais étant terminés, le câblage est déplacé, pour solliciter l'arbre suivant les autres directions.

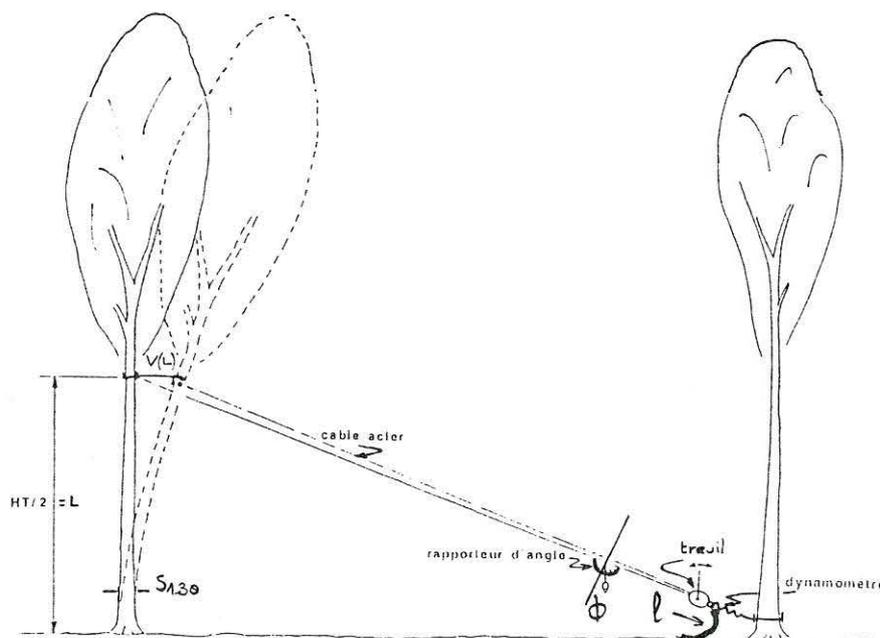


Figure 3.4 : Essai de flexion statique sur un arbre

3.3.3. Commentaires

Sur les arbres n° 1 à 10, aucun cycle d'accommodation préalable n'est réalisé. On peut penser qu'un arbre est constamment accommodé de par les sollicitations dues aux vents.

En revanche, sur les arbres n°11 et n°12, un cycle d'accommodation est réalisé avant le relevé des mesures en raison de la technique de mesures de déformations locales utilisée pour ces deux arbres (cf. § 3.4.2. 3.4.3). On pourra ainsi évaluer l'influence de l'accommodation sur le comportement de la structure.

De plus, pour les arbres n° 11 et 12, quelques points sont relevés au cours de la décharge.

La durée d'un essai, soit un cycle chargement-déchargement, est de 8 à 10 minutes pour les arbres 1 à 10 alors qu'elle est de 30 minutes environ pour les arbres n°11 et n°12. Le temps nécessaire aux mesures de déformations locales (§ 3.4.4) explique cette augmentation.

3.3.4. Construction des courbes expérimentales-précision des mesures

A partir des relevés expérimentaux d'efforts imposés, de longueur de câble treuillé et d'angle du câble avec une horizontale, on représente un graphique "charge-flèche" pour chaque essai.

exemple de relevés : Arbre n° 1, direction 1, essai 1. (notation F.1.1.1)
signification de la notation : "F.a.b.c" : F : flèche ; a : n°arbre ; b : n° direction opposée à la direction de flexion ; c : n° essai

F (N)	300	500	700	900	1100
l (m)	0,15	0,25	0,33	0,44	0,55
ϕ (°)	22,0	22,5	23,0	23,5	24,0

A partir de ces données, on calcule la charge corrigée (F) et la flèche (f) de la manière suivante :

$$F = \text{charge} \times \cos(\phi) \quad \text{et} \quad f = l \times \cos(\phi)$$

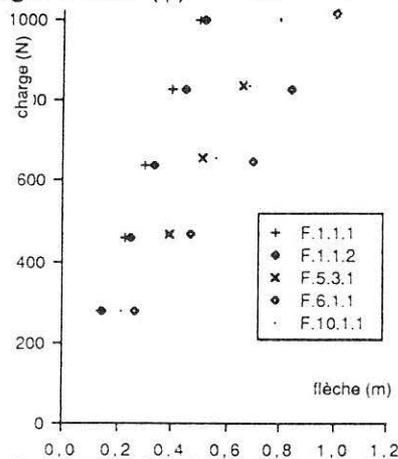


Figure 3.5 : Exemple de diagramme "charge-flèche"

Précision des relevés :

- L'effort est appliqué à ± 20 N.
- La longueur de câble relevée au ruban souple, gradué en centimètres, est donnée à ± 0.5 cm.
- L'allongement élastique du câble en acier toroné de diamètre 8 millimètres est évalué à 0,15 ‰ (Domino,1982) ; il n'est pas pris en compte dans l'analyse.
- Un rapporteur gradué en degré et fixé au câble, permet de relever un angle ϕ à $\pm 0.5^\circ$.

3.4. Mesure de déformations locales en périphérie d'une section droite d'un tronc

Il s'agit de mesurer des déformations en périphérie de tronc d'arbres fléchis artificiellement. Ces déformations concernent exclusivement le matériau bois, il est donc nécessaire d'écorcer localement le tronc sans dégrader les premières fibres du bois.

En se limitant à la périphérie du tronc, l'essai est considéré comme non destructif et peu traumatisant puisque la blessure occasionnée par l'écorçage local, peut se recouvrir d'un produit antifongique et insecticide.

3.4.1. Techniques de mesure des déformations

Pour mesurer une déformation, on prend une longueur de référence entre deux points repérés sur l'échantillon à tester et on mesure la variation de distance entre ces deux repères. Différentes techniques de mesure de déplacement mises au point généralement sur des matériaux autres que le bois, existent. Sur le bois, on utilise des extensomètres micromécaniques où les valeurs de déplacement peuvent être lues directement sur une échelle graduée ou un comparateur ; ce type d'instrument permet des mesures de déplacement avec une précision maximum du micron.

Les jauges ou les rosettes sont également employées. Toutefois la technique d'utilisation largement traitée dans la littérature sur divers matériaux (métaux,...) (Avril & al.,1974), posent des problèmes spécifiques au matériau bois (états de surface, humidité,...). Comme ces dernières sont relativement onéreuses, la conception et la réalisation de capteur adapté au besoin, s'avère parfois nécessaire ((Guénau-Saurat, 1974 ; Ferrand, 1981;...))

Dans le cadre de cette étude deux techniques sont retenues. Une première, appliquée sur 10 arbres, souple d'utilisation, se limite à un extensomètre micromécanique (§3.4.11). En second, nous avons utilisé des jauges d'extensométrie en vue d'une part, d'acquérir des informations simultanées en différents points périphériques, de deux sections droites du fût ; d'autre part, après les essais de flexion, des mesures de déformations (longitudinales, tangentielles et de cisaillement) sont effectuées après libération locale de contraintes internes. Pour des raisons de cohérence de texte, ces résultats concernant ces déformations, ne figureront pas ici, mais dans une publication à paraître. Comme la mise en œuvre de la méthode est relativement lourde, deux arbres seulement, seront testés.

3.4.1.1. Extensomètre micromécanique

Une partie des expériences, sur les arbres n°1 à 10, est réalisée avec un extensomètre micromécanique de type "Huggenberger-TENSO.DA250" de longueur de base 0,25 mètre ;

Cet appareil permet à partir de deux lectures de longueur (une longueur initiale et une finale) sur un comparateur gradué au micron d'accéder à l'élongation.

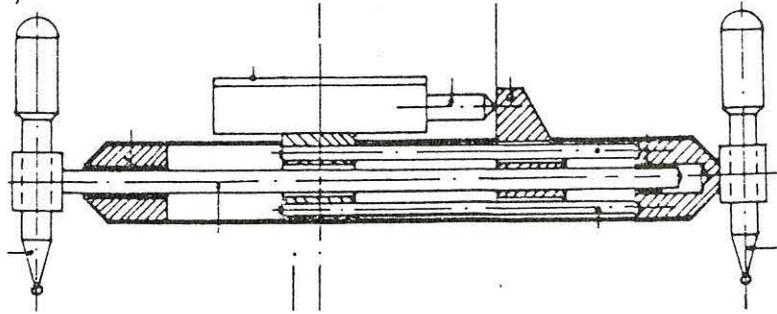


Figure 3.6 : Extensomètre mécanique type "Huggenberger"

(d'après la notice fournie avec l'appareil "TENSO.DA250")

Sur chaque arbre fléchi suivant une direction, la mesure de déformation longitudinale à hauteur d'homme, est réalisée sur la face en traction de la tige, c'est à dire suivant la direction opposée à la direction de flexion.

3.4.1.2. Utilisations des jauges électriques

Sur les arbres n°11 et 12, les mesures de déformations se font à l'aide des jauges électriques. Trois types de jauges sont utilisés dans le cadre de nos différents essais : ils permettent de mesurer des déformations suivant une ou plusieurs directions. Par exemple, les jauges "TML-PRS 10" permettent de mesurer des déformations suivant trois directions : longitudinale, tangentielle et à 45° des directions longitudinale et tangentielle. La combinaison de ses trois déformations donne accès à la composante de cisaillement ; Le calcul figure en annexe 2.

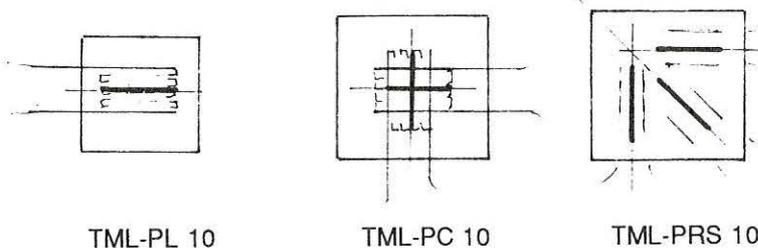


Figure 3.7 : Types de jauges utilisées

(référence du constructeur "TML STRAIN GAUGE TOKIO SOKKI KENKYUJO CO.,LTD")

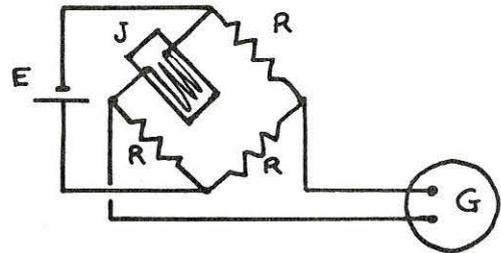
Utilisation des jauges électriques sur le bois :

Les jauges doivent être collées sur la surface du point à étudier. Avec le matériau bois, la procédure de préparation de la surface, diffère légèrement de celle appliquée sur les métaux (dégraissage). Avant collage sur le bois "vert", celui-ci est essuyé pour ôter l'humidité de surface, puis la jauge est collée avec une colle alphacyanocrylate à temps de prise rapide (de l'ordre de la seconde). Une légère pression du pouce sur la jauge permet d'obtenir des collages satisfaisants.

La jauge devant être reliée au câblage, on colle habituellement et par sécurité, à proximité de la jauge, une cosse-relais sur laquelle les fils de jauge et de câblage sont soudés. Pour des raisons pratiques, les jauges sont précâblées au laboratoire avec des fils et des fiches ; la connexion avec le câblage principal est réalisée avec des fiches "bananes". Après soudure, la jauge est contrôlée avant son utilisation.

Liaisons des jauges aux instruments de mesure :

L'appareil habituel utilisé pour la mesure de résistance électrique est le pont de Wheatstone ; 4 résistances dont une au moins est constituée par une jauge (J) sont traversées par un courant. Lorsqu'une résistance varie, en l'occurrence celle de la jauge déformée. (cf figure 3.8)



le pont préalablement équilibré ne l'est plus. La mesure de la tension de déséquilibre, renseigne sur la déformation de la jauge et par conséquent du matériau. Les différents types de câblage possibles (quart de pont, demi pont et pont complet) seront testés dans les essais préliminaires présentés ci-dessous.

Figure 3.8 : Principe du pont de Wheatstone

3.4.2. Mesure préalable sur bois vert - extensométrie sur bois vert

3.4.2.1. Le but

Des essais préliminaires réalisés au laboratoire (L.E.M.T.A/ENSEM) concernent essentiellement les jauges électriques ; leur but est de maîtriser au mieux la mise en oeuvre de la technique avant de la transposer sur le terrain où les conditions de travail sont différentes.

Deux types d'essais sont réalisés ; un premier concerne la flexion trois points réalisée sur une poutre d'épicéa à l'état vert tombant de scie, le second concerne des cycles "charge-décharge" en compression, sur un billon de Peuplier vert sollicité juste après abattage.

Enfin, une comparaison entre les deux méthodes, extensomètre et jauges sera présentée.

3.4.2.2. Flexion d'une poutre de bois vert

L'essai illustré par la figure 3.9, est réalisé sur une poutre de dimensions $1,10 \times 0,05 \times 0,015 \text{ m}^3$ (longitudinal x tangentiel x radial), la sollicitation réalisée à l'aide de poids se fait suivant la direction radiale de la poutre, les jauges sont collées sur les plans (L,T).

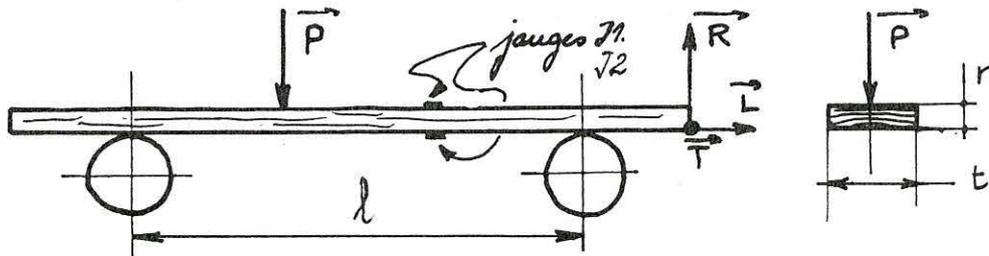


Figure 3.9 : Essai de flexion d'une poutre d'épicéa

Les jauges de types "TML. PL-10" et "TML. PC-10" collées avec de la colle alphacyanocrylate indiquent un comportement linéaire du bois pour les faces en traction et en compression de la poutre, ceci dans la gamme d'efforts appliqués (voir figure 3.10).

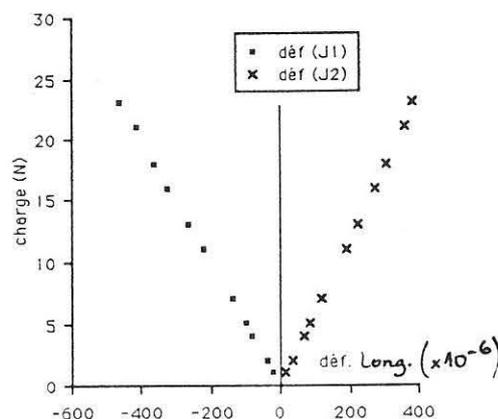


Figure 3.10 : Exemples de déformations enregistrées sur les jauges J1 et J2

Les deux types de montage testés, "pont complet " et "demi-pont" donnent des résultats non significativement différents à condition d'utiliser les jauges de compensation dans les conditions analogues à celles des jauges actives.

Les essais comparatifs des ponts d'extensométrie de conception différente, à savoir un pont de laboratoire type "Peckel-581DNH." alimenté en porteuse (5 kHz-220 volts) et un pont de terrain type "Strainert HWD-1" alimenté en continu indiquent des avantages en sensibilité et précision du premier, aux dépens d'une souplesse d'utilisation du second, plus léger et moins encombrant.

3.4.2.3. Compression d'un billon de bois vert

Le billon a pour diamètres moyens 0,205 mètre (gros bout) et 0,20 mètre (fin bout), sa longueur est de 0,65 mètre. Il est installé sous une presse hydraulique de type "Amsler-Laffon & Sohn". Après écorçage local en quatre points en quadrature, des jauges de type "TML.PRS-10" (rosette 0,45,90) sont collées à la colle alphacyanocrylate après être précablées (cf §3.4.2). Le billon est de droit fil, ce qui permet de coller chaque rosette de façon à avoir une jauge suivant le fil ; les repères tracés sur le support de la rosette permettent de l'aligner sur le bois où un trait de crayon "fuchsine" visualise le fil.

Le montage type "demi pont" est préféré au montage type "pont complet" pour des raisons pratiques, on utilise moins de jauges et de câblage.

Les jauges utilisées (12 jauges actives et 6 jauges de compensation) sont cablées et testées avec 3 boîtiers d'extension (jauges (L), jauges (T) et jauges (C-45°).

Le pont "Peckel" sert à la lecture visuelle des déformations. Il est relié à un conditionneur de voies lui-même connecté à un micro-ordinateur par liaison "RS 232", permettant l'acquisition de chaque valeur de déformations. Une commutation manuelle au niveau des boîtiers (L), (T) et (C-45°) donne accès aux 4 valeurs de déformations (1 par génératrice du billon). Une autre commutation manuelle sur un boîtier intermédiaire permet l'acquisition suivant l'une des trois directions (L, T, C-45°)

A titre de prévention vis à vis d'une coupure de courant (de tension) les valeurs sont imprimées au fur et à mesure de l'acquisition avant les opérations de fermeture et de sauvegarde des fichiers.

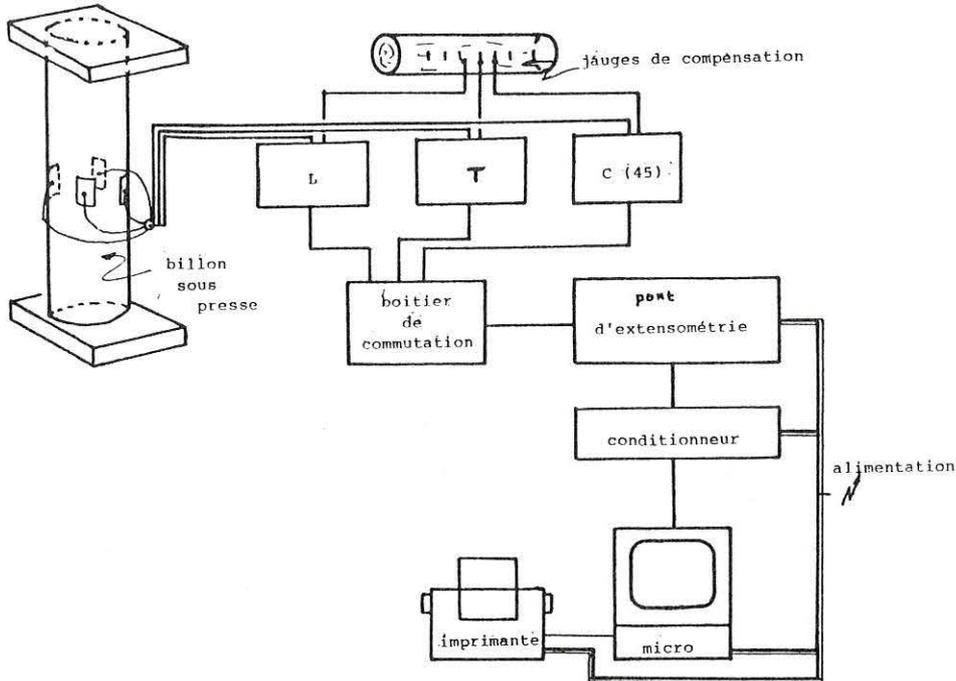


Figure 3.11 : Essai de compression d'un bilion avec équipement d'acquisition de données

Le montage est dans un premier temps testé avec la tension fournie par le secteur (220 volts-50 hertz), après mise au point du câblage et des différentes connexions, l'alimentation est fournie par un groupe électrogène (Lombardini-IH 218, Type 2300 ME). L'utilisation d'un filtre (R-L-C), pour améliorer la qualité de la tension fournie s'avère nécessaire. La tension est réglée en modulant le régime du moteur thermique, alimenté à l'essence.

Après ces mises au point et dans le but de tester et de se familiariser avec le montage, des essais de compression avec cycle charge-décharge sont réalisés.

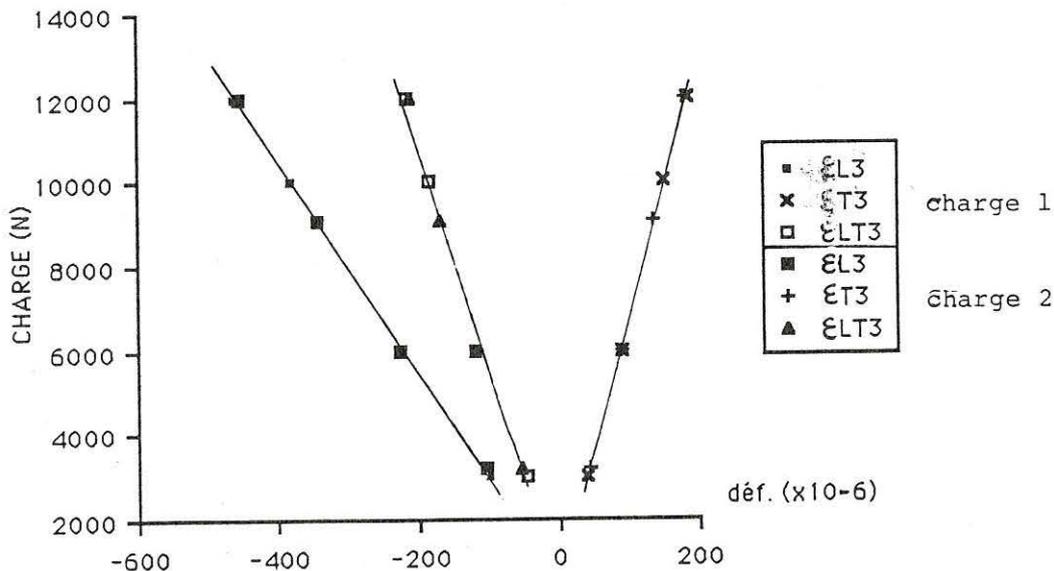


Figure 3.12 : Exemple de déformations enregistrées au cours de l'essai de compression

Les résultats obtenus et illustrés figure 3.12, montrent principalement que :

- dans la gamme d'effort appliqué, un comportement linéaire des déformations en fonction de l'effort appliqué, que ce soit au chargement ou au déchargement,
- on enregistre bien un raccourcissement de la jauge longitudinale et une élongation de la jauge tangentielle ; le rapport entre les deux valeurs est de 0,4.
- les mesures sont reproductibles entre deux essais à condition d'avoir fait un cycle d'accommodation préalable (ce cycle permet la mise en place de la matière de la structure, mais accomode également la jauge et le collage)

3.4.2.4. Comparaison des méthodes de mesure de déformations utilisées : jauge et extensomètre

Il s'agit de comparer les déformations enregistrées avec les jauges électriques et celles obtenues à partir de l'extensomètre "Huggenberger", en surface d'une poutre soumise à de la flexion quatre points (figure 3.13).

Deux poutres en bois ont été utilisées et une barre d'acier étiré

poutre "épicéa" - 100 x 4,7 x 2,4 cm³ (LxTxR)

poutre "peuplier" - 106 x 5,0 x 1,5 cm³ (LxTxR)

poutre "acier étiré"- 105 x 2 x 0,8 cm³

Les jauges de types "TML : PRS-10 et FLA-10" sont collées sur les poutres en bois. Sur l'acier, on a utilisé des jauges de types "TML : FLA-5", qui diffèrent par leur base de mesure : 5 mm au lieu de 10.

L'extensomètre et les jauges ont été testés sur les poutres en configuration de traction ; quelques points sont relevés en configuration de compression.

Les mesures sont réalisées dans la partie médiane de la poutre, là où le moment fléchissant est constant et pour éviter les effets de cisaillement liés à la proximité des appuis.

Pour chaque effort appliqué, la jauge sollicitée, montée en "demi-pont" indique une déformation notée $\epsilon_{\text{surf.}}$. L'allongement relevé à l'aide de l'extensomètre, entre les états initial et final de la poutre, donne accès à une déformation notée ϵ_H .

Sur la barre d'acier, l'extensomètre est positionné par deux marques de pointeau alors que sur les poutres en bois, des plots de positionnement sont plantés dans la poutre. Dans ce dernier cas, les pointes de

l'extensomètre se trouvent donc surélevées de 3 mm, de la surface de la poutre où se trouve la jauge.

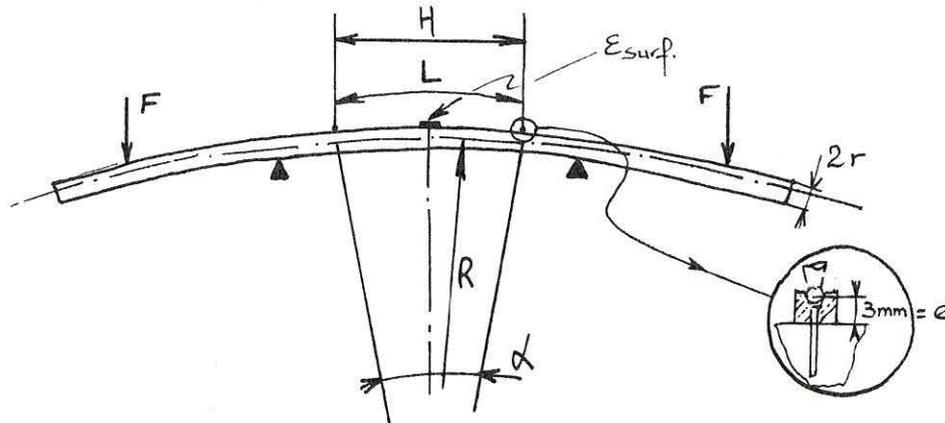


figure 3.13 : Schéma de l'essai de flexion pour la comparaison des méthodes de mesure de déformations

Analyse théorique :

Dans la partie médiane de la poutre fléchie, l'expression de la déformation de surface s'exprime comme suit : $\epsilon_{surf} = \frac{r}{R}$.

la longueur de l'arc vaut : $L = (R+r) \alpha = L_0 (1+\epsilon_{surf})$ (α en radian) (1)

la longueur de la corde vaut : $H = 2 (R+r+e) \sin \frac{\alpha}{2} = L_0 (1+\epsilon_H)$ (2)

de (1) on tire $\alpha = \frac{L_0 (1+\epsilon_{surf})}{(R+r)}$ que l'on remplace dans (2), il vient alors

$$H = 2 (R+r+e) \sin \left(\frac{L_0 (1+\epsilon_{surf})}{2 (R+r)} \right) = L_0 (1+\epsilon_H)$$

d'où l'expression :

$$\epsilon_H = \left[2 \left(\frac{r}{\epsilon_{surf}} + r + e \right) L_0 \right] \sin \left(\frac{L_0 \epsilon_{surf}}{2r} \right) - 1$$

remarque : Dans notre essai ($a = \frac{L_0 \epsilon_{surf}}{2r}$) reste un angle faible tel que $\sin a = a$; dans ce cas l'expression de ϵ_H peut être approchée par :

$$\epsilon_H = \epsilon_{surf} \left(1 + \frac{e}{r} \right)$$

Afin de chiffrer l'écart entre ϵ_{surf} et ϵ_H , une application numérique est proposée :

cas de la barre d'acier : l'extensomètre n'est pas surélevé de la surface $e = 0$ $L_0 = 0,25$ mètre ; $r = 4$ mm (on se fixe ϵ_{surf})

$$\epsilon_{surf} = 1000 \cdot 10^{-6} \quad \epsilon_H = 837 \cdot 10^{-6} \quad \frac{\epsilon_H}{\epsilon_{surf}} = 0,84$$

Les déformations enregistrées par l'extensomètre sont légèrement inférieures à celles mesurées en surface.

cas des poutres en bois : l'extensomètre est surélevé de la surface puisqu'il est positionné sur des plots . $e = 3\text{mm}$; $L_0 = 0,25\text{ mètre}$; $r = 12\text{ mm}$ pour la poutre en Epicéa et $r = 7,5\text{ mm}$ celle en Peuplier.

$$\text{(Epicéa)} \quad \epsilon_{\text{surf}} = 1000 \cdot 10^{-6} \quad \epsilon_H = 1230 \cdot 10^{-6} \quad \frac{\epsilon_H}{\epsilon_{\text{surf}}} = 1,23$$

$$\text{(Peuplier)} \quad \epsilon_{\text{surf}} = 1000 \cdot 10^{-6} \quad \epsilon_H = 1340 \cdot 10^{-6} \quad \frac{\epsilon_H}{\epsilon_{\text{surf}}} = 1,34$$

La position surélevée de l'extensomètre par rapport à la surface de la poutre, entraine des déformations longitudinales supérieures à celles enregistrées en surface, comme l'indiquent les rapports obtenus dans l'application numérique (1,23 et 1,34). Le rapport est d'autant plus élevé que la poutre est mince.

résultats expérimentaux :

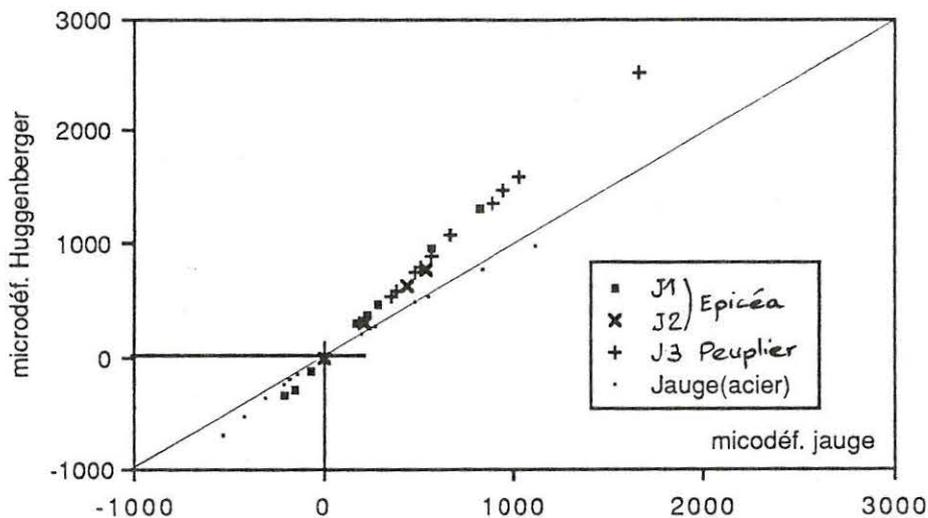


Figure 3.14 : Comparaison des déformations obtenues sur différentes jauges et avec l'extensomètre mécanique

- sur la barre d'acier, les déformations enregistrées par la jauge sont les déformations de surface. Elles sont légèrement supérieures à celles obtenues à l'aide de l'extensomètre.

- par contre, sur les poutres en bois les déformations obtenues à partir de l'extensomètre sont supérieures à celles indiquées par les jauges. Ces dernières sont inférieures aux déformations de surface dans un

rapport de l'ordre de 1,5. Les rapports obtenus sont de 1,4 et 1,6 pour les jauges J1 et J2 (PRS10) et de 1,5 pour la jauge J3 (FLA 5). Ces rapports sont plus élevés que ceux prévus par l'analyse.

L'hypothèse retenue pour expliquer cet écart, concerne la colle. Lors du collage de la jauge, sur bois sec ou vert, l'adhésif pénètre superficiellement dans le matériau bois, contrairement à un matériau tel que l'acier. La polymérisation de la colle au sein du bois, modifie le comportement local de la structure. Par conséquent, les déformations enregistrées ne sont pas celles du bois mais celle du composite "bois + colle" qui est plus rigide.

Conclusion

Le collage de jauges d'extensométrie sur un matériau poreux tel que le bois, semble rigidifier localement l'échantillon, modifiant ainsi son comportement local. Faute d'explication complémentaire concernant l'écart entre les déformations observées selon les deux méthodes et sachant que sur les arbres le rapport $\left(\frac{e}{r}\right)$ est de l'ordre de 2%, les valeurs données par les jauges seront multipliées par 1,5 pour la comparaison des résultats obtenus selon les deux méthodes de mesures. La conception et l'emploi de capteurs adaptés au besoin, sont donc à préconiser, pour éviter ce genre de problème. Il serait également intéressant de vérifier ce résultat sur d'autres échantillons d'essences différentes et avec diverses colles de type "alphacyanocrylate".

3.4.2.5. Précisions des résultats

Le pont d'extensométrie "de terrain" possède un vernier gradué en 2 microdéformations tandis que sur le pont "Peckel", un calibrage permet de sélectionner la précision désirée, celle-ci pouvant aller jusqu'à 0.1 microdéformation. Les mesures envisagées ne demandant pas une précision extrême, le calibrage du pont "Peckel est choisi tel que la précision obtenue est de ± 0.5 microdéformation . A partir des différents essais réalisés, l'incertitude expérimentale pour les essais de flexion est estimée à ± 4 microdéformations. Le montage testé pour l'essai de compression, permet des mesures avec une précision de ± 5 microdéformations.

Dans un cas comme dans l'autre, cette incertitude est liée aux différents appareils, au câblage. Les connexions jauges-câblage, non soudées, ne semblent pas pénaliser la précision des mesures, tout au moins dans la gamme de précision souhaitée ici.

3.4.2.6. Disposition du matériel

Les équipements (pont d'extensométrie, micro-ordinateur,...) sont disposés dans une voiture ; en effet la solution motorisée est retenue pour les raisons suivantes :

- la qualité du terrain permet l'accès aux arbres choisis, avec un véhicule.
- le matériel de laboratoire, conçu pour l'intérieur, agencé à l'arrière d'une camionnette, est abrité des effets climatiques extérieurs (ensoleillement, courant d'air, humidité, poussières,...)
- la voiture est mise au garage durant la nuit, cela permet d'éviter les éventuels aléas techniques liés à l'humidité et la fraîcheur de la nuit
- la connexion des différents appareils est faite pour la durée de la campagne d'essais (cette durée est fonction des conditions météorologiques)

3.4.2.7. Conclusions

La chaîne d'acquisition opérationnelle au laboratoire peut s'agencer à l'arrière d'une camionnette, permettant ainsi le transport et la protection du matériel expérimental sur le terrain.

Le montage type "demi-pont" est préféré au montage "pont complet";

Le collage des jauges précâblées donne des résultats satisfaisants durant une semaine au moins.

Les déformations observées avec les jauges d'extensométrie seront corrigées par un facteur (x1,5) pour être interprétées avec celles obtenues avec l'extensomètre "Huggenberger".

3.4.3. Protocoles de mesure de déformations locales sur des troncs d'arbres

3.4.3.1. Mesures avec jauges électriques

préparation de l'essai :

Le protocole ci-dessous est réalisé sur 2 arbres ; les mesures de déformations sont faites en 8 points qui se répartissent en 2 circonférences de 4 points situés en quadrature sur chacune. Les circonférences sont distantes de 74 cm pour l'arbre n°11 et 65 cm pour l'arbre n°12.

- le câble est accroché sur l'arbre à la hauteur souhaitée : l'arbre jouant le rôle de point fixe est choisi parmi ceux figurant dans la direction du plan de flexion décidée. L'angle, entre le plan de flexion réel et celui souhaité n'est pas relevé exactement
- après écorçage local du tronc, sans couper les fibres, les 8 points sont repérés et matérialisés sur le bois ; le fil du bois relevé visuellement est appuyé au crayon "fuchsine". Ce trait sert de repère pour positionner et coller les rosettes préalablement câblées.
- après collage des 8 rosettes actives, la connexion est faite avec le câblage principal ; les jauges de compensation collées sur un morceau de "Peuplier" à l'état vert, permettent un montage type "demi-pont".
- l'échantillon de bois servant de support aux jauges de compensation est placé dans l'ambiance climatique analogue à celle de l'arbre, puisque placé à environ 1 mètre.
- des écrans protecteurs en papiers sont disposés sur le tronc pour protéger les rosettes, du rayonnement solaire (l'exposition solaire d'une face fausserait l'observation des mesures),
- la mise sous tension des différentes voies permet le contrôle du câblage et la détection d'éventuelle(s) anomalie(s),
- l'arbre est accommodé en flexion ,
- équilibrage des différentes voies (8 points x 3 jauges),

essai de flexion

Ces diverses opérations terminées, l'essai proprement dit est réalisé pour chaque direction comme suit :

- pour chaque valeur d'effort (F) appliqué, on procède à l'acquisition des 24 mesures de déformations résultantes de la sollicitation imposée. Le chargement prend les valeurs 300, 500, 700, 900 et 1100 Newtons, bien que le matériel de traction permette de charger au-delà de 1100 Newtons et afin de ne pas détériorer le tronc ou/et l'enracinement cette limite n'est pas dépassée. Une phase de déchargement avec acquisition suit immédiatement la phase de chargement. La durée d'un cycle charge - décharge est de l'ordre de 30 minutes.

Deux cycles complets sont réalisés, avant de changer la direction du plan de flexion : le second est orthogonal au premier.

Afin de chiffrer l'influence du poids du houppier situé au dessus du point d'application de l'effort, ce houppier est tronçonné.

Après cette opération délicate, le tronc est fléchi suivant une direction en appliquant un cycle "charge-décharge" selon le protocole précédent. La direction du plan de flexion est celle vers laquelle l'arbre est naturellement incliné et correspond donc à la première direction de flexion.

Remarques :

Lors de l'opération de suppression du houppier, les jauges n° 4 et 7 de l'arbre n° 12 sont mises hors d'usage.

Lors de cette même opération, les relevés de déformations sont réalisés entre l'état initial où l'arbre est complet, et l'état final où l'arbre n'a plus de houppier. Les déformations enregistrées en périphérie d'une section droite du tronc renseignent sur l'influence de la suppression du chargement que représente le houppier pour le fût. Les résultats correspondants feront l'objet d'une prochaine publication.

3.4.3.2. Mesures avec extensomètre mécanique

L'extensomètre "Huggenberger" étant plus souple d'utilisation, une campagne d'essais est réalisée sur 10 arbres. Lorsque l'arbre est fléchi suivant une direction, la mesure de déformation longitudinale, se fait dans le plan de flexion, en périphérie du tronc sur la partie en configuration de traction lors de l'essai ; la direction de flexion porte le n° du point de mesure.

Les arbres n° 2,3,4,5,8,9 et 10 sont fléchis suivant 4 directions en quadrature et les arbres 1,6,7 suivant 3 directions (cf § 3.3.1)

A deux hauteurs situées à 1,05 mètre et 1,3 mètre environ, l'écorce est ôtée sans couper de fibres, sur une surface de 2 cm² environ. 2 plots évidés et plantés à une distance voisine de 0,25 m l'un de l'autre, permettent de faire un relevé de longueur initiale servant de longueur de référence avant que le tronc sollicité ne se déforme.

Le chargement est appliqué dans les mêmes conditions que celles figurant au paragraphe précédent et pour chaque palier un relevé de longueur entre les deux plots est réalisé permettant ainsi le calcul d'une déformation :

$$\text{déformation} = \frac{l_{\text{finale}} - l_{\text{initiale}}}{l_{\text{initiale}}}$$

Les arbres sont fléchis systématiquement deux fois, suivant chaque direction, sans accommodation préalable.

Remarque : ce type d'extensomètre est habituellement employé en position horizontale, pour son utilisation en position verticale, il faut exercer une légère pression de la main sur les poignées pour que les pointes de l'extensomètre soient correctement positionnées.

3.4.3.3. Construction des courbes expérimentales

A partir des relevés expérimentaux d'efforts imposés, de hauteur de point d'application, d'angle du câble avec une horizontale et de déformation locale, on représente un graphique "moment imposé-déformation" pour chaque essai.

exemple de relevés : Arbre n° 1, essai 1, direction 1.(notation D.1.1.1)
signification de la notation : "D.a.b.c" : D : déformation ; a : n°arbre ; b : n° direction opposée à la direction de flexion ; c : n° essai

F (N)	300	500	700	900	1100
ϕ (°)	22,0	22,5	23,0	23,5	24,0
ϵL (x10-6)	140	380	580	740	960

Le moment imposé sur le tronc, est calculé à partir de l'effort, de l'angle et de la hauteur du point d'application de l'effort : $M=(L-1,3)F \cos\phi$

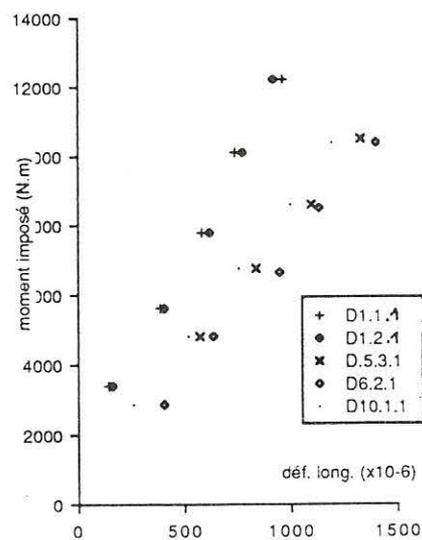


Figure 3.14 : Exemple de diagramme "moment imposé-déformation"

3.5. Module d'élasticité longitudinal sur éprouvettes de bois à l'état vert

Après abattage de l'arbre et pesage des différentes parties (billons, branches et feuilles) la bille de pied de chaque arbre est transportée à la Station de Recherches sur la Qualité des Bois du C.R.F (Champenoux). Après écorçage, sur chaque bille, on effectue un relevé d'angle de fil. La bille est disposée sur un pied en forme de V, ce qui permet de tracer une génératrice sur la bille ; on relève à l'aide d'un rapporteur, l'angle (μ) que fait le fil du bois avec cette génératrice au niveau de la section située à 1,3 mètre.

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
μ (°)	0	0	0	0	5	5	2	0	2	0	0	0

Tableau 3.1: Angle de fil relevé à 1,3 mètre pour les arbres 1 à 12

A l'exception des individus n° 5 et n°6, on peut qualifier les billons de droit fil, tout au moins au niveau de la périphérie.

Pour chaque bille, 8 éprouvettes sans singularités (nœuds,...) de dimensions normalisées 20x20x360 mm³ (RxTxL) sont usinées dans les planches de dosse comme l'indique la figure 3.15.

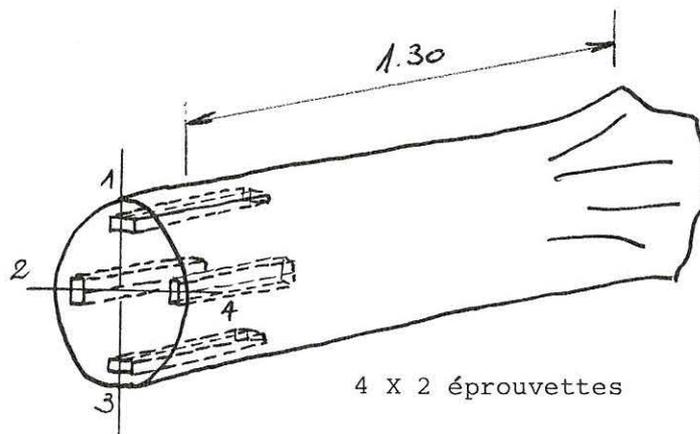


Figure 3.15 : Prélèvement des éprouvettes de flexion dans la bille de pied

Remarques :

Pour obtenir des éprouvettes de droit fil dans les dosses, des essais de fendage de billon sont tentés ; comme la qualité des dosses obtenues ne donnent pas la satisfactions attendues, les dosses sont sciées à l'aide d'une scie à ruban. A partir d'un carrelet initial, les dimensions finales de l'éprouvette sont obtenues par rabotage.

Ces différents usinages réalisés sur le bois vert rendent certaines opérations délicates comme par exemple le rabotage ; de plus la présence de bois de réaction (bois "pelucheux") dans certain échantillon rend l'état de surface tel, que l'éprouvette est inutilisable.

Après leur réalisation, les éprouvettes sont sollicitées en flexion statique sur une machine universelle type "Wolpert-Amsler Testwell V2-100" ; la flèche qui est mesurée permet le calcul d'un module E_L . Toutes les éprouvettes sont testées en flexion 3 points et certaines sont également testées en flexion 4 points. (entre les deux campagnes expérimentales, des modifications ont été apportées pour réaliser l'essai de flexion statique 4 points)

Les contraintes horaires ne permettent pas toujours de réaliser les essais sur toutes les éprouvettes dans la même journée ; les éprouvettes non testées sont alors emballées dans un chiffon humide, pour limiter les transferts d'humidité. Les essais ont lieu dans une pièce où les conditions de température et d'humidité sont supposées constantes pendant la durée des essais.

3.5.1. Protocoles d'essais

3.5.1.1. Flexion 3 points

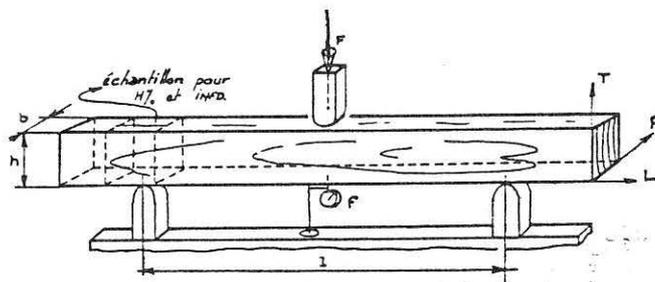


Figure 3.16: Essai de flexion 3 points sur éprouvette

96 éprouvettes (8 x 12 arbres) sont testées suivant le protocole ci-dessous

- positionnement correct de l'éprouvette sur les rouleaux d'appuis,
- chargement d'accommodation jusqu'à 300 newtons, à vitesse lente (8mm/mn),
- après déchargement, 2 séries de chargement à 100, 200 et 300 Newtons sont effectués. A chaque palier de charge, les flèches sont relevées à l'aide d'un comparateur gradué en micron,
- relevé des dimensions b et h de l'éprouvette au calibre à coulisse d'une précision du $1/100^e$ de millimètre. Pour chaque valeur b et h , 3 mesures sont réalisées (une à chaque extrémité et une en position médiane) pour

prendre en compte l'éventuel défaut de parallélisme de l'échantillon ; les valeurs b et h prises pour le calcul de E_L représentent la moyenne de ces 3 valeurs,

- prélèvement d'un échantillon ($2 \times 2 \times 4 \text{ cm}^3$: $R_x T_x L$) comme l'indique la figure 3.16 pour la détermination de son humidité et de son infradensité selon les protocoles décrits au § 3.6.2

Remarques :

Durant les essais, une dizaine d'éprouvettes sont pesées avant et après essai, permettant ainsi le calcul de perte d'humidité de l'échantillon au cours de l'expérience qui dure 5 minutes environ. Comme cette perte d'humidité est inférieure à 1%, nous considérons que l'humidité reste constante pendant l'essai. De plus, l'humidité de l'échantillon est supposée représenter l'humidité de l'éprouvette.

L'infradensité de l'échantillon est également supposée représenter celle de l'éprouvette.

3.5.1.2. Flexion 4 points

16 éprouvettes sont testées en flexion 4 points suivant le protocole décrit dans la norme N.F.B51 016. Ces éprouvettes ont été préalablement testées en flexion 3 points. Les modules obtenus dans l'un et l'autre des essais seront comparés. Tout comme dans l'essai de flexion 3 points, un échantillon de ($2 \times 2 \times 4 \text{ cm}^3$: $R_x T_x L$) est prélevé dans l'éprouvette pour en déterminer l'humidité et l'infradensité selon les protocoles décrits au § 3.6.

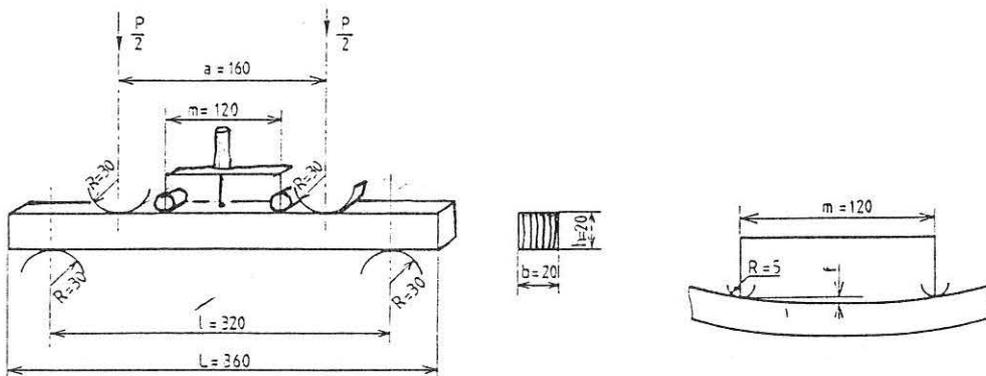


Figure 3.17 : Essai de flexion 4 points

3.5.2. Calculs des modules

Calcul de E_{L3} dans l'essai de flexion 3 points :

il est déterminé par la formule suivante :

$$(1) \quad E_{L3} = \frac{F d^3}{4 f_3 b h^3} \text{ exprimé en MPa où}$$

F : charge appliquée en daN

d : distance entre les axes d'appui (280 mm)

f₃ : flèche mesurée en mm

h : dimension tangentielle de l'éprouvette en mm

b : dimension radiale de l'éprouvette en mm

Selon le protocole explicité plus haut, F représente l'écart entre les paliers de chargement soit 100, 100 et 200 newtons. On obtient alors deux séries de trois valeurs de E_{L3} qui sont moyennées pour obtenir un E_{L3} moyen par éprouvette.

Calcul de E_{L4} dans le cas d'un essai de flexion 4 points :

il est déterminé par la formule suivante :

$$(2) \quad E_{L4} = \frac{3 F (l-a)m^2}{8 f_4 b h^3} \text{ exprimé en MPa où}$$

F : charge appliquée en daN

l : longueur entre les axes d'appui (mm)

a : distance entre les axes des têtes de chargement (mm)

m : distance entre les axes des cylindres de support du comparateur mesurant la flèche (mm)

f₄ : flèche mesurée en mm

h : dimension tangentielle de l'éprouvette en mm

b : dimension radiale de l'éprouvette en mm

Calcul d'erreur :

à partir de l'expression (1) du module E_{L3} ci-dessus, on a

$$(3) \quad \frac{\Delta E_{L3}}{E_{L3}} = \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta f_3}{f_3} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{3\Delta h}{h} + \left(\frac{3\Delta l}{l} \right)$$

à partir de l'expression (2) du module E_{L4} ci-dessus, il vient

$$(4) \quad \frac{\Delta E_{L4}}{E_{L4}} = \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{3\Delta h}{h} + \frac{\Delta f_4}{f_4} + \left(\frac{2\Delta m}{m} + \frac{\Delta(l-a)}{l-a} \right)$$

Dans les expressions (3) et (4) ci dessus, les termes entre parenthèses sont des termes sur lesquels une erreur systématique est faite ; ils ne sont pas pris en compte dans le calcul de l'erreur.

application numérique :

- F = 150 N

ΔF = 5 N

- f₃ = 0,50 mm

Δf₃ = 10⁻² mm

- f₄ = 0,30 mm

Δf₄ = 10⁻³ mm

- d = 280 mm $\Delta d = 2 \cdot 10^{-1}$ mm
- b = h = 20 mm $\Delta h = \Delta b = 2 \cdot 10^{-1}$ mm

$$(3) = \frac{\Delta E_{L3}}{E_{L3}} = 9,0\% \quad \text{et} \quad (4) = \frac{\Delta E_{L4}}{E_{L4}} = 7,5\%$$

Une part importante de cette erreur est attribuable au terme $\frac{\Delta F}{F}$ lié à la machine et à l'opérateur ; en effet, l'intensité de l'effort appliqué est contrôlée manuellement au moyen d'une vanne qui règle un débit hydraulique.

3.5.3. Résultats sur les modules d'élasticité E_{L3} et E_{L4}

3.5.3.1. Comparaison des modules E_{L3} et E_{L4}

L'expression utilisée, pour le calcul du module E_{L3} obtenu à partir de l'essai de flexion 3 points, néglige l'effet de l'effort tranchant ; ce module est alors minimisé par rapport au module réel. La figure 3.17 met en évidence la liaison entre E_{L3} et E_{L4} .

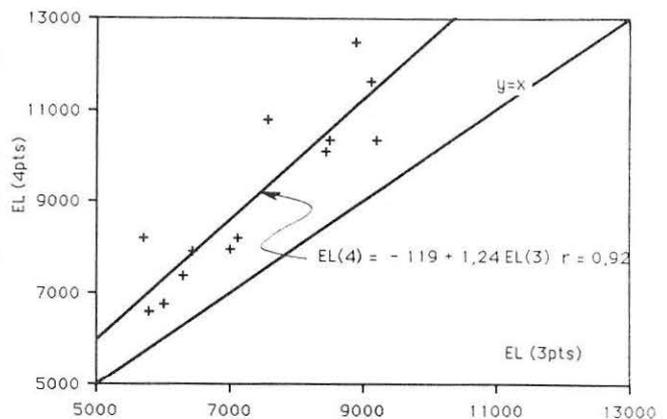


Figure 3.17 : Comparaison des modules d'élasticité E_{L3} et E_{L4}

Afin de corriger les modules longitudinaux obtenus sur les éprouvettes testées en flexion 3 points, on associe au nuage obtenu, une droite de régression : $E_{L4} = 1,24 E_{L3} - 119$. Le coefficient de corrélation $r = 0,92$ est significatif au seuil de 1‰.

L'hypothèse du test de nullité de l'ordonnée à l'origine de la droite est vérifiée en comparant une valeur de t calculée, à une valeur de t tabulée avec n-2 degrés de liberté. Ici, on a :

$$t_{\text{obs}} = \frac{\bar{Y} - a\bar{X}}{S_{XY} \left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{\sum X^2} \right)} = -0,39 < t_{0,975} = 2,2$$

comme t_{obs} est inférieur au $t_{0,975}$ tabulé, l'hypothèse de la nullité de l'ordonnée à l'origine est acceptée au risque de 5%.

Pour la suite de l'analyse, les calculs seront effectués avec les modules d'élasticité E_{L4} obtenus à partir de la correction suivante : $E_{L4} = 1,23 E_{L3}$, (exception faite des arbres n° 11 et n° 12 pour lesquels nous prendrons les modules E_{L4} obtenus à partir des essais de flexion 4 points).

3.5.3.2. Commentaires sur les modules d'élasticité observés

Les modules d'élasticité E_{L4} observés sur bois "vert" varient dans un rapport de 1 à 2 entre les douze arbres ; ils s'échelonnent de 6000 Mpa à 12000 Mpa. Pour la même essence, des variations analogues sont observables sur des modules obtenus sur des échantillons de bois à 12% d'humidité. (CTBA,1984 ; ...)

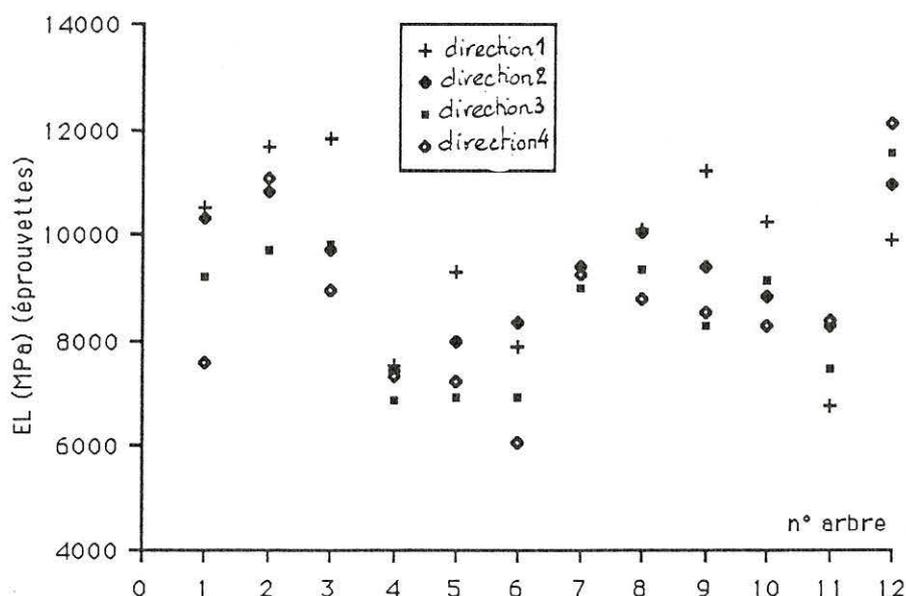


Figure 3.18 : Module d'élasticité (E_{L4}) obtenus sur les éprouvettes issues des différents arbres

Au sein d'un même arbre, on note également une disparité entre les modules obtenus entre les différentes directions ; toutefois les arbres n° 4 et 7 n'indiquent pas de telle variation (cf figure 3.18).

Il s'avère que pour la plupart des arbres, il existe une relation d'ordre entre les différents modules observés ; les plus élevés sont ceux obtenus suivant les directions n°1 (9 arbres) ou n°4 (2 arbres). Il faut rapprocher cette observation de la présence éventuelle de bois de réaction au sein des éprouvettes prélevées dans la zone 1 (ou 4) puisque cette direction est choisie sur la face tendue de l'arbre.

La littérature signale le lien existant entre module d'élasticité, présence de bois de réaction et infradensité. Par exemple, Clarke (1973) montre qu'à densité égale, des éprouvettes de Hêtre (*Fagus sylvatica*) avec du bois de tension, ont un module d'Young plus élevé ($\approx 10\%$) que celle sans bois de tension.

Connaissant la liaison entre le module d'élasticité et l'infradensité établie sur de nombreuses essences (De Reboul,1988 ;...) dans ce qui

suit, on vérifiera la validité de cette liaison, sur l'échantillonnage utilisé.

3.6. Mesures de l'infradensité et de l'humidité

3.6.1. Infradensité sur échantillon

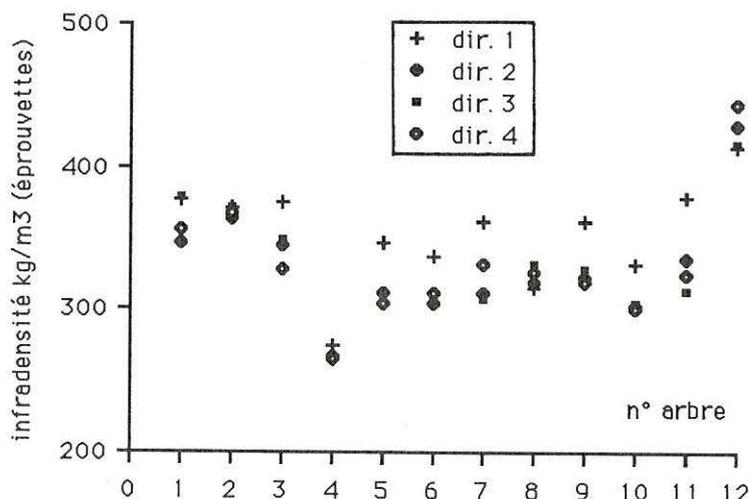
L'infradensité est définie comme le rapport de la masse anhydre de l'échantillon par son volume saturé : $\text{infradensité} = \frac{\text{masse anhydre}}{\text{volume saturé}} \text{ (Kg/m}^3\text{)}$.

L'état saturé des échantillons est obtenu par immersion de ceux ci dans l'eau durant quatre jours au moins. Des phases de vide alternées avec des phases de pression atmosphérique permettent d'accélérer le processus de saturation. Le volume saturé est alors mesuré à partir de la méthode d'Archimède.

L'état anhydre est obtenu après un séjour de 24 heures de l'échantillon en étuve où la température est de 102°C.

3.6.2.1. Infradensité des éprouvettes

Les données des valeurs d'infradensité obtenues sur chaque éprouvette figurent en annexe 3.



(chaque point est la moyenne des deux valeurs obtenues sur les éprouvettes d'une même direction)

Figure 3.19 : Infradensités observées sur les échantillons issus des éprouvettes

Les valeurs d'infradensité observée s'échelonnent de 265 kg/m³ à 440 kg/m³, avec une valeur moyenne qui est de 332 kg/m³ l'écart type étant

de 50 kg/m^3 . Sur le genre "Populus", la littérature donne des valeurs d'infradensité semblables (Lenz, op.cit ; Nepveu, op. cit; ...)

Les arbres n° 4 et n° 12 se distinguent des autres, dans la mesure où le premier possède l'infradensité moyenne la plus faible (269 kg/m^3) et le second, la plus forte (428 kg/m^3).

La figure 3.19 met également en évidence la différence d'infradensité entre quatre endroits en quadrature, d'une section de fût. Les arbres n° 2 et n° 4 se différencient des autres puisque les valeurs d'infradensité observées, sont constantes.

Il s'avère également que l'infradensité la plus élevée est généralement, celle obtenue sur les échantillons issus de la génératrice 1, génératrice correspondant à la face "tendue" de l'arbre. Sur différents "Peupliers", Lenz (1954) montre que l'infradensité du bois de réaction est plus élevée que celle du bois normal. La présence probable, de bois de réaction à ce niveau du fût, expliquerait donc, les valeurs plus élevées trouvées.

Des résultats complémentaires, relatifs à la variation radiale d'infradensité en périphérie d'une section du fût de chaque arbre, sont donnés en annexe 10.

3.6.2.2. Liaison infradensité - module d'élasticité (E_{L4})

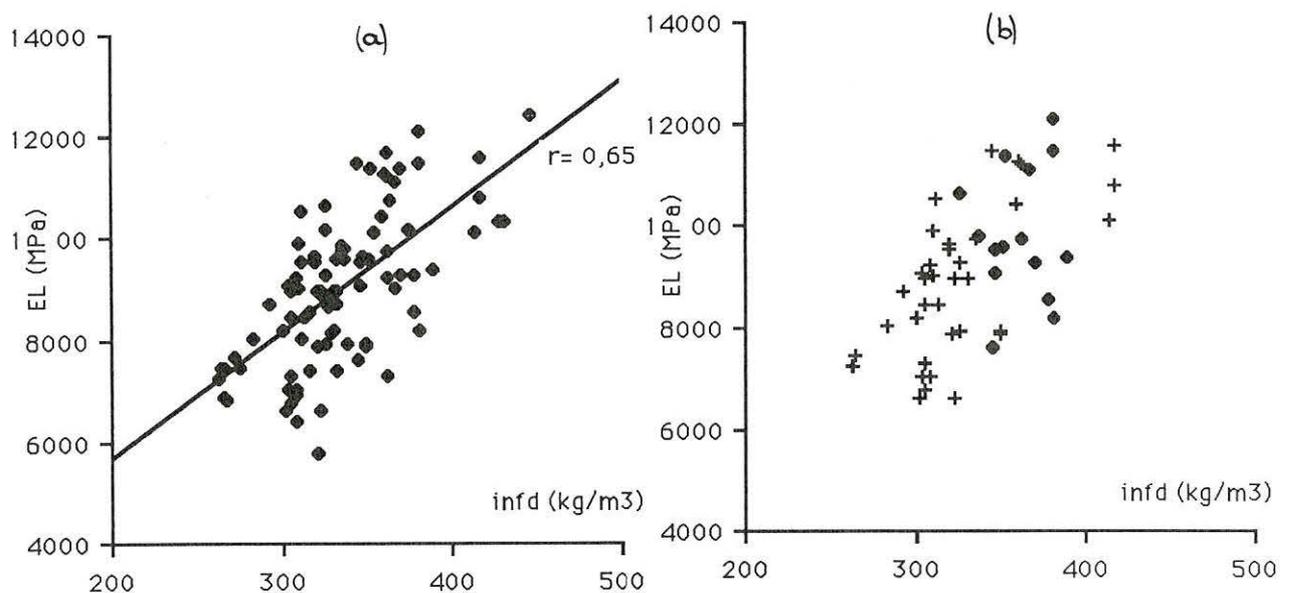


Figure 3.20 a: Liaison module d'élasticité E_{L4} -infradensité

b : liaison E_{L4} -infradensité. (♦) représente les échantillons supposés avec bois de tension

La figure 3.20-a met en évidence la corrélation positive qui existe entre l'infradensité observée et le module d'élasticité E_{L4} obtenu sur des éprouvettes de bois "vert". le coefficient de corrélation obtenu, $r = 0,65$ est significatif au risque de 1%.

On s'aperçoit également qu'à infradensité égale, le module d'élasticité peut varier dans un rapport de 1 à 1,5 ; l'infradensité n'est pas le seul facteur explicatif du module d'élasticité longitudinal. A ce sujet, bon nombre d'auteurs ont tenté de relier différents paramètres physiques, anatomiques ou de croissance, aux propriétés mécaniques en générale, et donc au module d'élasticité E_L en particulier (De Reboul, (op.cit);...)

Pour mettre en évidence la présence de bois de tension, des essais de coloration (phloroglucinol + acide chlorhydrique 50%) ont été tentés sur des rondelles, fraîchement tronçonnées et rabotées. Les résultats furent décevants, puisqu'il était impossible de délimiter clairement les zones de bois de tension, alors que la forme des rondelles, ne permettait pas de douter de la présence de ce bois.

Toutefois, nous avons déjà évoqué, dans le paragraphe ci-dessus, la variation angulaire d'infradensité au niveau d'une section, en liaison avec la présence de bois de réaction. Ceci est à rapprocher de la liaison module d'élasticité-infradensité, au sein d'un même individu illustrée figure 3.21.

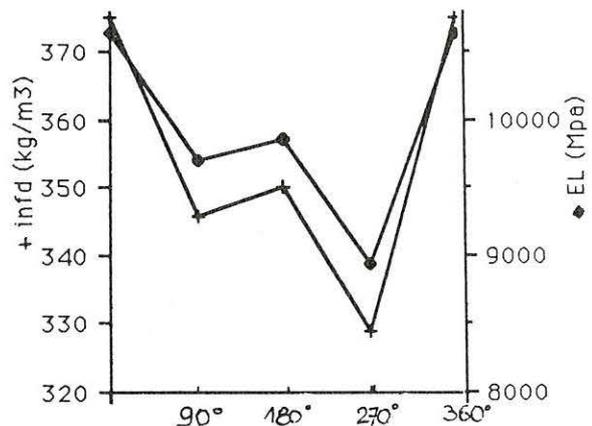


Figure 3.21 : Variation angulaire de l'infradensité et du module d'élasticité au sein d'un arbre

A partir de là, Nepveu (communication personnelle) propose comme critère de présence de bois de tension dans un échantillon, la méthode suivante : pour un même arbre, les 8 valeurs d'infradensité observées sont comparées à l'infradensité moyenne obtenue à partir des 3 infradensités les plus faibles. Lorsque la valeur de l'infradensité d'un échantillon dépasse cette infradensité moyenne d'un certain seuil (ici, nous choisissons 10%) l'échantillon est censé contenir du bois de tension.

En suivant cette méthode, la figure 3.20-b représente la liaison "module d'élasticité-infradensité" obtenue avec les échantillons retenus ; pour chaque arbre, il s'agit des 3 échantillons qui ont l'infradensité la plus faible, et ceux dont l'infradensité est supérieure de 10% de la valeur moyenne trouvée.

La figure 3.20-b montre également, que la dissociation des échantillons selon le critère de présence de bois de tension adopté, n'améliore pas la liaison module d'élasticité-infradensité.

3.6.2. Humidité des arbres et des éprouvettes

L'humidité d'un échantillon est obtenue à partir des masses humide (M_H) et anhydre (M_O) de cet échantillon. La masse anhydre est obtenue après passage de 24 heures de l'échantillon en étuve dont la température est de 102 °C. On calcule alors l'humidité à partir de la définition :

$$H\% = 100 \frac{M_H - M_O}{M_O}$$

humidité des arbres

Après les essais de flexion sur arbre, une carotte de sondage de 3 à 4 centimètres de longueur, est prélevée radialement à l'aide d'une tarière de Pressler, aux quatre points en quadrature. Chaque carotte numérotée, est mise dans un tube fermé hermétiquement. Au laboratoire l'ensemble est pesé, puis mis en étuve à 102°C avant d'être à nouveau pesé (masse anhydre). Le relevé des différentes masses permet le calcul de l'humidité de l'échantillon, à partir de la formule donnée ci dessus.

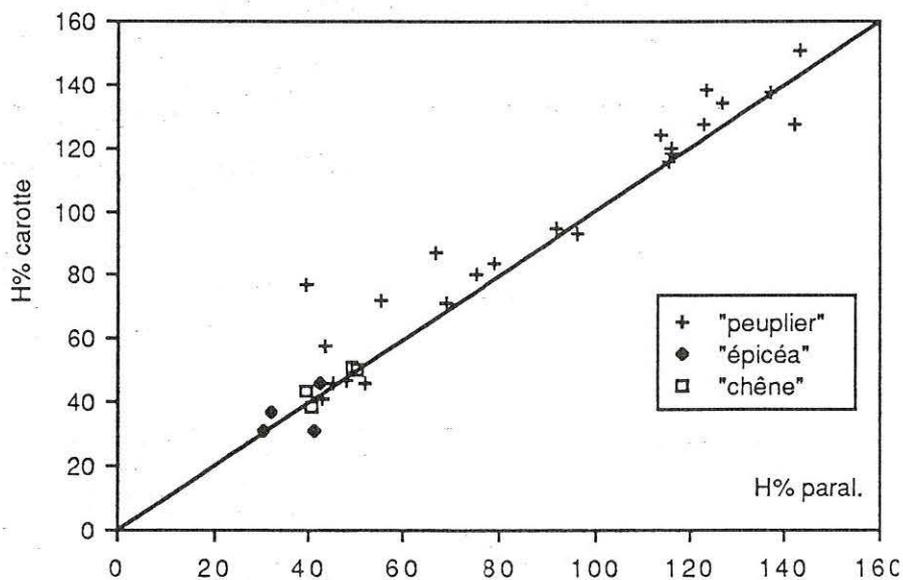


Figure 3.22 : Liaison humidité sur carotte - humidité sur parallépipède

Lors de l'extraction de la carotte, le processus d'usinage à la tarière est tel, qu'en bout de l'outil il y a une zone de compression qui entraîne

probablement un déplacement de l'eau ; par conséquent, l'humidité de la carotte extraite est probablement inférieure à l'humidité "in situ". Pour vérifier cela, sur différents billons de "Peuplier", un échantillon parallépipédique de 1x1x3 cm³ (LxTxR) et une carotte radiale de 3 cm de long sont prélevés à proximité l'un de l'autre ; on compare alors l'humidité de chaque échantillon (carotte de sondage et parallépipéde). La figure 3.22 indique la bonne liaison obtenue entre l'humidité mesurée sur parallépipéde et celle mesurée sur carotte. L'humidité mesurée sur une carotte est censée représenter l'humidité locale dans le fût.

le tableau ci-dessous présente les humidités observées localement sur chaque point de mesure de déformation (4 points en quadrature) pour l'ensemble des arbres ; il s'agit de l'humidité mesurée sur une carotte de 3 à 4 centimètres de long prélevée après l'essai de flexion.

point	1	2	3	4
N° arbre				
1	73	-	113	72
2	68	80	74	82
3	83	101	103	88
4	114	107	127	117
5	96	122	132	124
6	105	123	132	116
7	125	-	112	118
8	115	123	127	108
9	117	103	112	116
10	69	70	71	59
11	98	-	-	100
12	64	-	-	65

Tableau 3.2 : Humidité en périphérie d'une section de tige, située à 1,3 mètre

Il apparait clairement que les humidités observées localement dépassent l'humidité du point de saturation des fibres, proche de 30%. Ces mesures donnent l'ordre de grandeur que l'humidité peut atteindre au sein d'un tronc, tout au moins sur une couronne périphérique d'une section située à hauteur d'homme et à un instant donné.

humidité moyenne des arbres

Les taux d'humidité observés sur les différentes rondelles prélevées tous les 2,5 mètres au niveau de la tige (cf §3.2.2) permettent d'obtenir un taux d'humidité moyen de la tige.

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
H (%)	71	67	73	82	86	85	89	85	75	76	129	97

Tableau 3.3: Taux d'humidité moyen par arbre

Ces taux d'humidité permettent également une comparaison des masses anhydres moyennes observées avec celles indiquées par des modèles prévisionnels issus de la littérature. Pour effectuer cette comparaison, les taux d'humidité moyens des feuilles et des branches sont pris égaux à celui de la tige.

Il apparaît qu'une mesure du diamètre de l'arbre permet d'estimer la masse anhydre de la partie aérienne de l'arbre (cf figure 3.23). Une correction par un facteur lié à l'humidité moyenne de l'arbre donne alors un ordre de grandeur de la masse humide de l'arbre (racines non comprise).

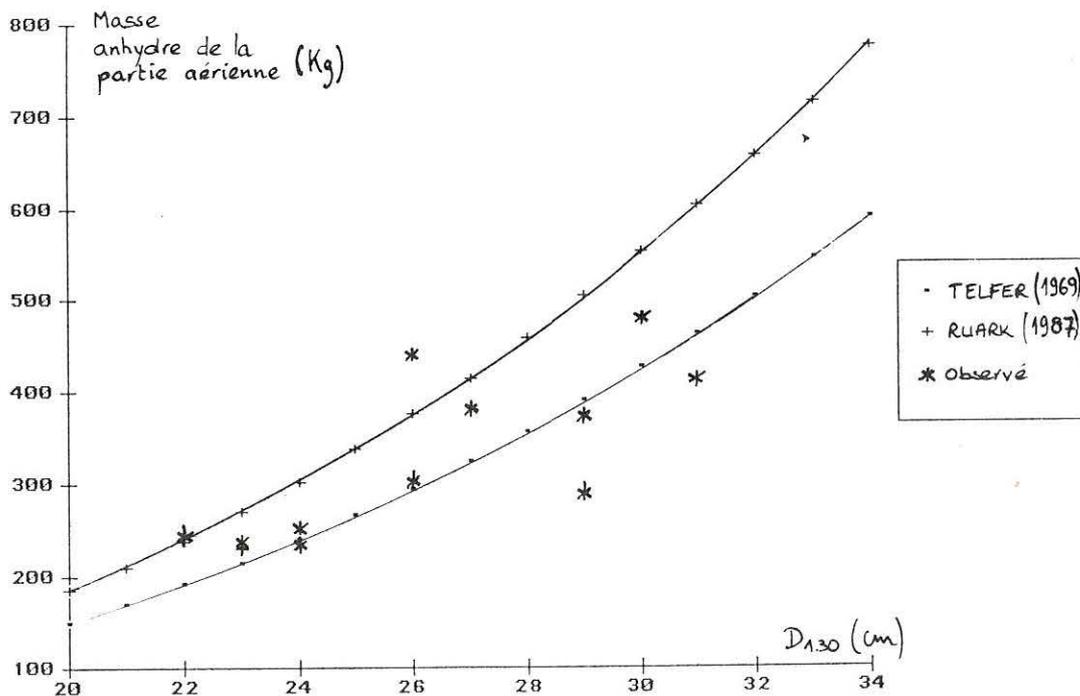


Figure 3.23 : Liaison entre diamètre à 1,30 m et masse anhydre de la partie aérienne de l'arbre (tige + branches + feuilles) selon 2 modèles prévisionnels.

Les masses anhydres observées des 12 "Peupliers" sont également indiquées.

humidité des éprouvettes

Les valeurs observées sur les échantillons issus des éprouvettes de flexion sont supérieures au point de saturation des fibres. Les valeurs figurent dans le tableau "infradensité-module E_L " en annexe 3.

3.7. Conclusion

A la fin de ce chapitre, nous disposons pour chaque arbre, de données géométriques, de relevés de la flèche à mi-hauteur de la tige et de déformations en périphérie d'une section droite du fût. En plus sur chaque arbre, 8 éprouvettes de bois à l'état "vert", ont été prélevées et testées en flexion 3 et 4 points. L'ensemble de ces éléments, permet de présenter une analyse comparative sur les résultats de mesures de rigidité globale et rigidité locale.

Chapitre 4

Interprétations des résultats expérimentaux

L'objectif de ce chapitre est d'analyser les résultats expérimentaux obtenus sur la douzaine d'arbres testés, afin de valider l'analyse du chapitre 2.

L'allure des diagrammes "charge-flèche" et "moment imposé-déformation longitudinale" est vérifiée et l'on définit les rigidités globales et locales pour chaque essai.

Le comportement élastique de la structure, est discuté, tant au niveau global que local.

Différentes modélisations du fût permettent de calculer les rigidités globales et locales, qui sont alors comparées aux rigidités observées. Ces dernières permettent de calculer, sous certaines hypothèses, un module d'élasticité moyen du fût (à partir de K) et un module d'élasticité d'une section droite (à partir de KI). Les différents cas de figures permettent de proposer des classements qualitatifs des individus. Ces classements sont comparés à celui observé, à partir des modules d'élasticité sur éprouvettes de petites dimensions.

L'effet du poids du houppier est analysé sur deux arbres. On propose également sur ces individus, une analyse détaillée du comportement local de deux sections droites du tronc fléchi de façon artificielle.

4.1. Rigidités expérimentales et reproductibilité des essais

4.1.1. Allure des courbes expérimentales

A partir des relevés expérimentaux, on représente les diagrammes "charge-flèche" et "moment imposé-déformation". Les axes de ces derniers ont été décrits au chapitre 3 (§3.3.4 et §3.4.4.3)

On peut ainsi contrôler l'allure de chaque diagramme pour analyser le comportement de la structure ; la figure 4.1 illustre les différents types de diagrammes obtenus.

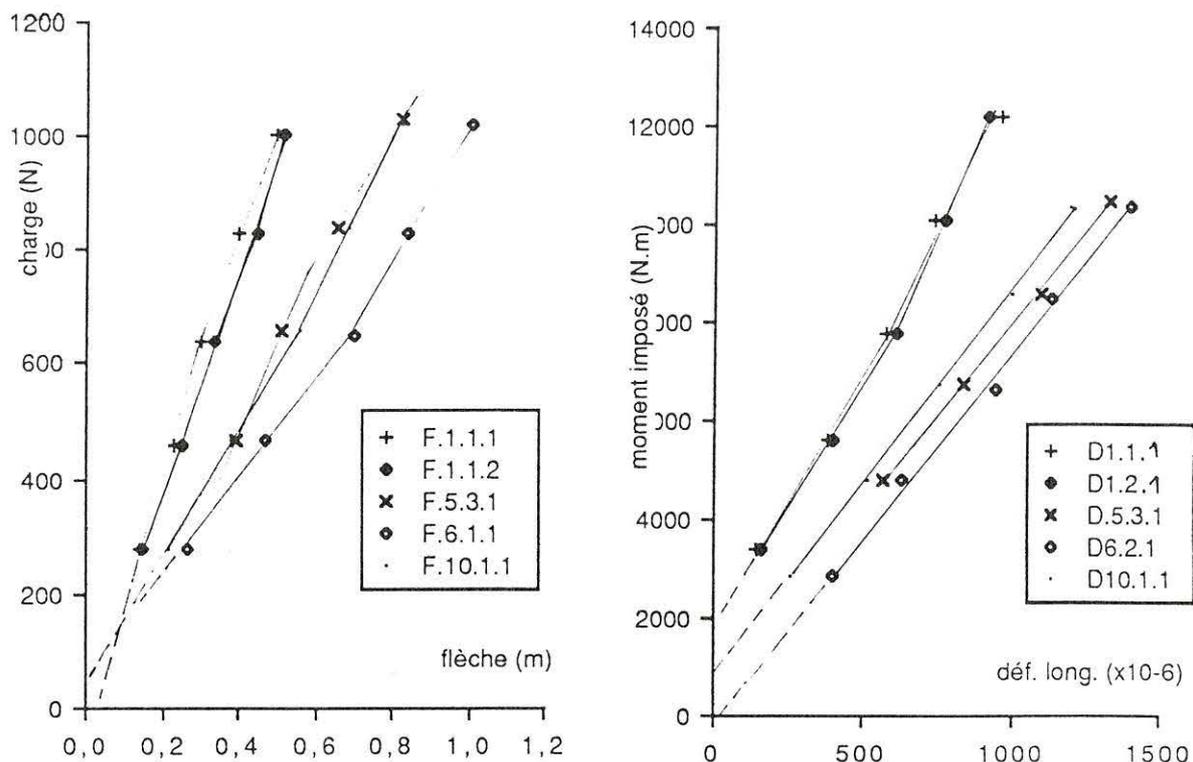


Figure 4.1 : Différentes allures de courbes expérimentales

Notation : F.1.1.1 ; Flèche ,arbre n°1 , direction 1, essai 1

D.6.2.1 ; Déformation, arbre n°6, direction 2, essai 1

La position de l'origine de ces courbes est décalée par rapport à l'origine du repère ; ce décalage est liée à la méthode de mesure de la longueur de câble treuillée. Le premier point du diagramme est pris comme référence, à la place de l'origine du repère.

Les diagrammes "charge-flèche" et "moment-déformation" dont l'allure peut être décrite par des droites ou des segments.

En premier lieu, l'ensemble des points est décrit par une droite ; s'il s'avère que la droite passe par tous les points, compte tenu des incertitudes, cette solution est adoptée pour l'essai en question. Toutefois, dans certains cas, deux ou trois points sont situés du même coté de la droite de régression et s'écartent de celle ci d'une valeur supérieure à l'incertitude expérimentale de chaque point. Lorsque cette situation se présente, deux segments de droite sont tracés pour décrire les points expérimentaux.

Cette démarche, suivie pour l'ensemble des diagrammes "charge-flèche" et "moment imposé-déformation" permet d'attribuer à un arbre, lors de l'essai de flexion, un comportement linéaire ou non.

4.1.2. Incertitudes sur les pentes des diagrammes expérimentaux

Chaque point de mesure est entaché d'une erreur expérimentale, par conséquent la pente de la droite de régression est comprise dans un intervalle. Cet intervalle de confiance sur la pente peut être déterminé de façon statistique sachant qu'il est : $p \pm t \cdot \sigma_p$ où t est lu dans la table de Student avec $(n-1)$ degré de liberté à la probabilité choisie (p : pente ; σ_p : écart type de p) (Snedecor, op.cit.). Cette méthode n'est pas adoptée ici, vu le faible nombre de points que nous disposons pour chaque essai.

Les incertitudes sur les valeurs de K et de Kl sont déterminées de la manière suivante :

Chaque point est entaché d'une erreur expérimentale ; ainsi pour chaque nuage "charge-flèche" relatif à un essai, on a :

$(f_1 \pm \Delta f, F_1 \pm \Delta F)$; $(f_2 \pm \Delta f, F_2 \pm \Delta F)$; ; $(f_5 \pm \Delta f, F_5 \pm \Delta F)$

de même que pour le nuage "moment imposé-déformation longitudinale" $(\epsilon_{L1} \pm \Delta \epsilon, M_1 \pm \Delta M)$; $(\epsilon_{L2} \pm \Delta \epsilon, M_2 \pm \Delta M)$; ; $(\epsilon_{L5} \pm \Delta \epsilon, M_5 \pm \Delta M)$

A partir de chaque point expérimental relevé, on a donc 4 points extrêmes, par exemple $[(f_1 + \Delta f, F_1), (f_1 - \Delta f, F_1), (f_1, F_1 + \Delta F), (f_1, F_1 - \Delta F)]$; les différentes combinaisons des points extrêmes, donnent un faisceau de droites de régression, dont les pentes se répartissent autour d'une valeur moyenne.

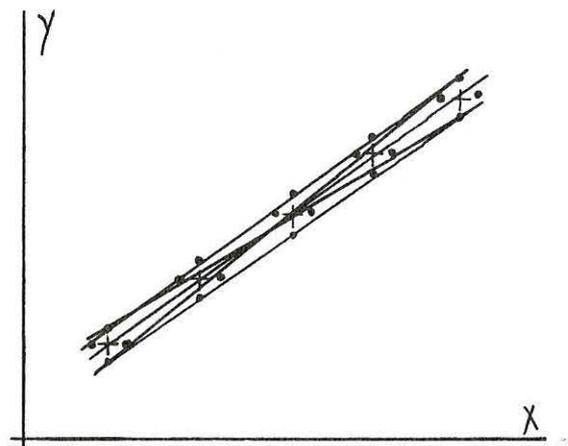


Figure 4.2 : Faisceau de droites de régression

En supposant que la répartition des différentes pentes simulées suit une loi normale, on a 95 % des pentes qui ne diffèrent de la valeur moyenne que d'au plus de $\pm 2 \sigma$ (σ étant l'écart type de la population des pentes observées.)

En réalisant cette simulation, on obtient pour l'arbre n°1-essai1-direction 1 :

$$K = 2025 \pm 96 \text{ (N/m) soit } K = 2025 \pm 4,5\%$$

$$Kl = 11,0 \pm 0,5 \text{ (} \times 10^6 \text{ N.m) soit } Kl = 11 \pm 5\% \text{ (} \times 10^6 \text{ N.m)}$$

Pour la suite de l'analyse, l'incertitude sur la rigidité globale K est prise égale à 4,5 %, alors que celle sur la rigidité locale, est de 5%

4.1.3. Comportement linéaire

Pour l'ensemble des 84 essais réalisés sur les 12 arbres, 66 cas présentent des graphiques "charge-flèche" et "moment appliqué-déformation (longitudinale)" dont la description est linéaire. Pour tous ces essais, les rigidités locale K et globale KI sont calculées en accord avec leurs définitions respectives explicitées au § 2.1.6.1. Comme tous les essais ne se classent pas dans cette catégorie, il convient d'envisager le comportement non linéaire.

4.1.4. Comportement non linéaire

Parmi les 18 essais restant sur 84, 15 essais présentent un diagramme "charge-flèche" décrit par deux segments de droite, alors que le diagramme "moment imposé-déformation" est décrit par une droite.

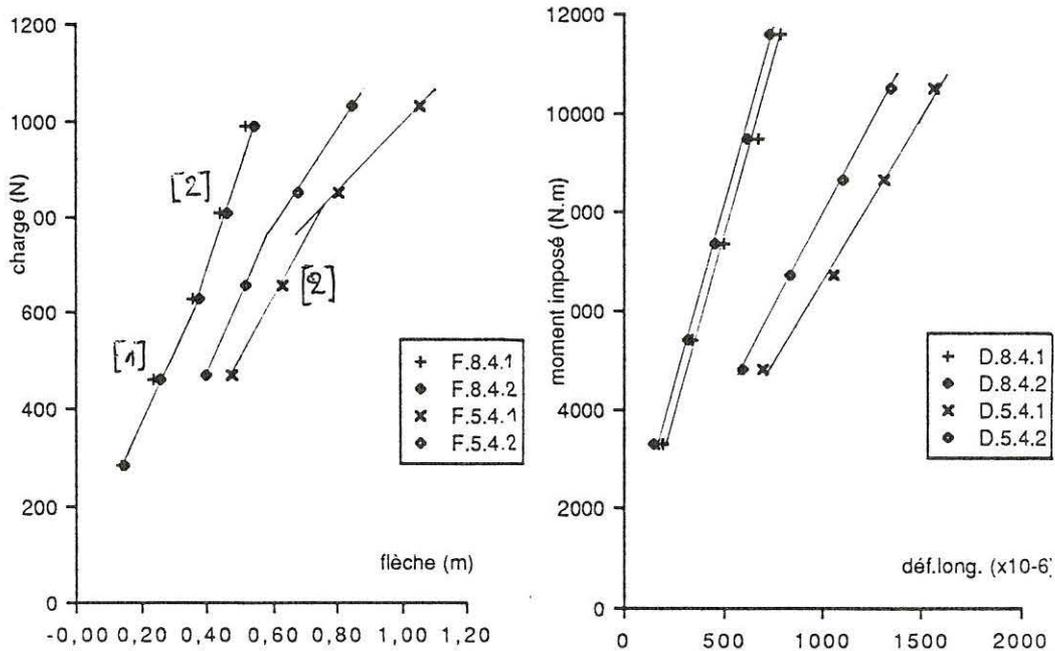


Figure 4.3 : Exemple d'individus au comportement global linéaire par morceau

commentaires :

Une "rigidification" de la structure est observée lorsque la concavité du diagramme est positive (arbre n°8) ; c'est un "assouplissement" lorsque la concavité est négative (arbre n° 5).

Une première hypothèse, qui relève des conditions expérimentales de l'essai de flexion est avancée pour expliquer cette "rigidification" en cours d'essai.

Lorsque l'arbre est fléchi, son houppier se déplace et vient parfois en contact avec le houppier d'un arbre voisin. On imagine aisément, que si le houppier de l'arbre sollicité se déplace en entraînant le houppier voisin, alors ce déplacement est réduit. En effet, le moment de flexion imposé à la tige, auquel vient s'ajouter le moment supplémentaire lié au poids du houppier est réduit par le moment lié à l'obstacle que représente le houppier voisin.

S'il en est ainsi, un raisonnement analogue permet de déduire que les déformations locales enregistrées par le tronc doivent être inférieures à ce qu'elles seraient sans obstacle. Le diagramme "moment-déformation" doit présenter dans ce cas un changement de concavité significatif. Comme ce n'est pas le cas, cette première hypothèse est écartée.

Seule l'hypothèse relative au comportement de l'encastrement combiné avec celui du tronc, telle qu'elle est formulée au chapitre 2, est retenue. La rigidité K est alors déterminée sur la partie [2] du diagramme "charge -flèche" attribuée essentiellement au tronc.

Enfin, les diagrammes de concavité négative s'expliquent par une flexion de la tige associée à une rotation de l'encastrement, mais cette fois sans seuil limite. Il va de soi qu'une augmentation de l'effort appliqué entraîne certainement, le déracinement de l'arbre. Pour ces types de diagramme, la pente de la première phase du diagramme, donc la plus élevée, est retenue pour l'analyse.

Les deux situations citées ci-dessus se rencontrent sur des arbres qui ont déjà été sollicités suivant d'autres directions. On peut alors se poser la question de l'influence des sollicitations précédentes, sur le comportement de la structure fléchie suivant les directions opposées ou latérales. L'analyse est présentée ultérieurement (§ 4.1.5.4)

Enfin, il reste 3 cas sur 84, où nous ne pouvons expliquer la position des points sur le diagramme "moment imposé-déformation longitudinale" ; les valeurs de K_I ne sont alors pas retenues. Toutefois, les valeurs des rigidités globales sont conservées.

4.1.5. Reproductibilité de l'essai : comportement élastique

Il s'agit de comparer les comportements des arbres entre le premier et le deuxième essai, pour une direction donnée.

Dans un premier temps, les rigidités globales et locales sont comparées d'un essai à l'autre. Ensuite l'influence d'une accommodation préalable sur l'arbre est analysée.

Les relevés effectués lors de la flexion des arbres n°11 et n°12, préalablement accommodés, et des arbres n° 1 à 10 non accommodés initialement, vont permettre de vérifier l'hypothèse d'élasticité du matériau, formulée au chapitre 1.

4.1.5.1. Comparaison des rigidités globales et locales entre deux essais consécutifs

Dans ce qui suit, les valeurs sont regroupées sans distinction entre les arbres et les directions de sollicitation. Les figures 4.4-a et 4.4-b illustrent la reproductibilité des essais, aux niveaux global et local.

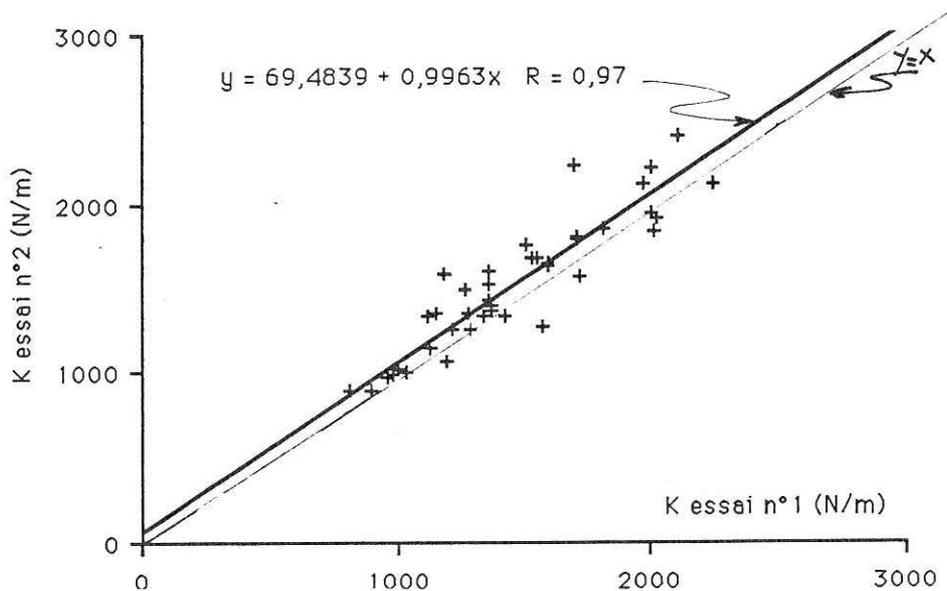


Figure 4.4-a : Comparaison des rigidités globales entre deux essais consécutifs

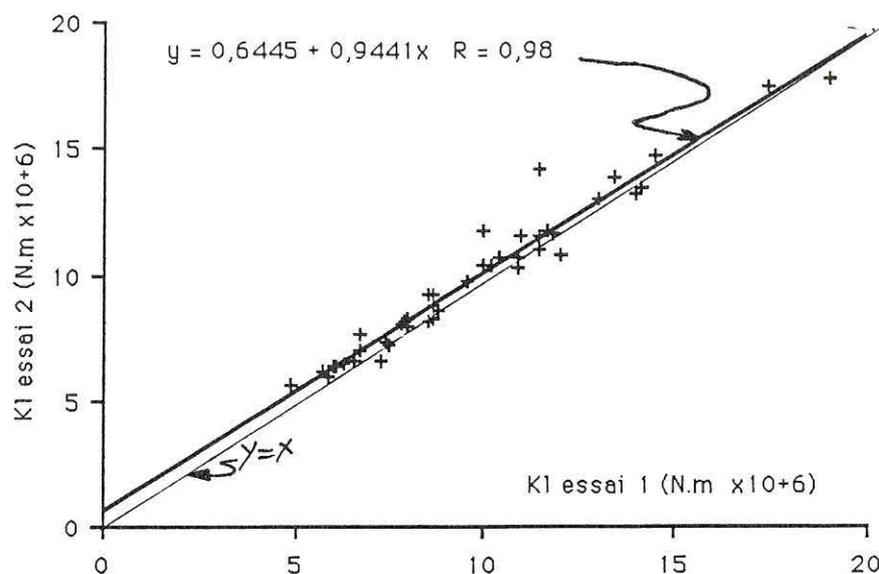


Figure 4.4-b : Comparaison des rigidités locales entre deux essais consécutifs

La position des nuages vis à vis des bissectrices des repères, montrent que :

- dans la majorité des cas les rigidités globales observées au 2^o essai sont supérieures ou égales à celles obtenues lors du 1^{er} essai. On note également une certaine dispersion des points, liées au fait que la rigidité globale traduit le comportement de la structure complète, (parties aérienne et souterraine).

- une bonne reproductibilité des mesures de rigidités locales. Cette rigidité apparait comme une propriété intrinsèque du tronc.

Les droites de régression obtenues dans un cas comme dans l'autre, attestent de la bonne liaison obtenues entre les rigidités comparées ; les coefficients de corrélation (0,97 et 0,98) sont dans les deux cas, significatifs au risque de 1%.

Nous proposons sur chaque rigidité, K et Kl une analyse de variance à deux facteurs sans interaction. Un facteur "essai" qui représente les essais pour tous les arbres sans distinction de directions, et un facteur "ordre" qui correspond aux deux sollicitations consécutives réalisées sur un même arbre suivant une même direction. Le modèle s'écrit :

$$X_{ij} = m + \alpha_i + \beta_j + r_{ij} \quad \text{où}$$

m : la valeur moyenne du caractère X_{ij} (rigidité K et Kl)

α_i : effet de modalité i (essais)

β_j : effet de modalité j (ordres)

r_{ij} : variable aléatoire de moyenne 0 et d'écart type σ (résidu)

Ces analyses de variance vont nous permettre de vérifier l'influence des deux facteurs sur les rigidités K et KI ; la reproductibilité des mesures se calcule alors de la façon suivante : $R = \sigma_f^2 / (\sigma_f^2 + \sigma_r^2)$ avec σ_f^2 , la variance du facteur étudié et σ_r^2 , la variance résiduelle. De plus, l'écart type résiduel rapporté à la valeur moyenne du caractère analysé, donne le coefficient de variation de ce caractère.

	d.d.l	s.c.e	c.m	F
essais	41	57,71 10 ⁺⁶	1,40 10 ⁺⁶	89,0 ***
ordres	1	0,05 10 ⁺⁶	0,05 10 ⁺⁶	3,2 ns
résidu	41	0,64 10 ⁺⁶	15580	
totale	83	58,40 10 ⁺⁶		

Tableau 4.1 : Analyse de variance sur la rigidité globale

	d.d.l	s.c.e	c.m	F
essais	48	1113,34	23,2	96,6 ***
ordres	1	0,14	0,14	0,6 ns
résidu	48	11,70	0,24	
totale	97	1125,17		

Tableau 4.2 : Analyse de variance sur la rigidité locale

Les résultats des analyses de variances consignés dans les tableaux 4.1 et 4.2 mettent en évidence un effet significatif du facteur "essais" et un effet non significatif du facteur "ordres" sur les rigidités K et KI.

Sur la rigidité globale, la reproductibilité calculée est de $R_K = 0,989$, celle obtenue sur la rigidité locale est $R_{KI} = 0,990$; les valeurs R_K et R_{KI} indique pour l'ensemble des essais, une très bonne reproductibilité des mesures de K et KI. (C'est une illustration complémentaire des figures 4.4-a et 4.4-b)

Le coefficient de variation obtenu sur la rigidité globale K est de 7,5% et celui trouvé sur la rigidité locale KI est de 4,5%.

Ces deux coefficients sont du même ordre de grandeur que l'incertitude expérimentale (cf 4.1.2). Toutefois le coefficient de variation sur K est plus élevé que celui observé sur KI ; ceci traduit bien le fait que la grandeur K rend compte du comportement de la partie aérienne et

souterraine de la structure, alors que KI traduit le comportement, plus reproductible d'un essai à l'autre, de la section droite étudiée.

Voyons dans un premier temps si l'acomodation préalable de l'arbre influence la reproductibilité de l'essai de flexion ; ensuite nous vérifierons l'effet des sollicitations suivant une direction sur le comportement observé, suivant les directions opposée ou latérales.

4.1.5.2.Reproductibilité du comportement d'arbres accommodés préalablement

comportement global

Les arbres 11 et 12, préalablement fléchis avant l'essai proprement dit, présentent des diagrammes "charge-flèche" linéaire et non linéaire pour l'une et l'autre des directions de sollicitation alors que les diagrammes "moment imposé-déformation longitudinale" sont linéaires dans tous les cas.

N° arbre	dir	Kcharge 1(N/m)	Kcharge 2(N/m)	K1/K2
11	1	4540	4130	1,10
11	4 (1)	4010	4490	0,89
11	4 (2)	5200	5290	0,98
12	1(1)	950	1070	0,88
12	1(2)	1535	1680	0,91
12	4	1605	1630	0,98

Tableau 4.3 : Rigidités globales obtenues au 1^{er} et 2^o essai

(indice (1) : fait référence à la première partie du diagramme "charge-flèche")

(indice (2) : fait référence à la deuxième partie du diagramme "charge-flèche")

commentaire :

L'arbre 11 indique suivant la direction 1, une diminution de rigidité globale entre les deux essais.

Suivant la direction 4, une augmentation de rigidité est enregistrée sur la partie attribuée essentiellement à l'encastrement. Les deuxièmes phases, relatives essentiellement au tronc, sont similaires.

Ce résultat ne se produit pas sur l'arbre n°12, pour lequel on a une augmentation de rigidité globale, lors des 2 phases, entre le premier et le second essai. Enfin, cet arbre présente un comportement élastique lorsqu'on le fléchit deux fois suivant la direction 4

comportement local :

Il s'agit ici d'une description du comportement local entre deux essais consécutifs ; une analyse complémentaire du comportement local du tronc (déformations tangentielles et de cisaillement) est proposée en annexe.

arbre 11 : flexion suivant direction 2

	dir 2	dir 4	dir 6	dir 8
KI1	-17,4	19,0	-17,6	16,9
KI2	-17,5	17,8	-17,8	16,6
KI1/KI2	0,99	1,06	0,99	1,02

arbre 12 : flexion suivant direction 3

	dir 1	dir 3	dir 5	dir 7
KI1	6,1	-5,7	5,6	-5,7
KI2	6,3	-6,1	6,4	6,1
KI1/KI2	0,97	0,93	0,87	0,93

arbre 12 : flexion suivant direction 2

	dir 2	dir 4	dir 6	dir 8
KI1	-6,0	4,9	-7,4	6,6
KI2	-6,3	5,6	-5,5	6,8
KI1/KI2	0,95	0,88	1,34	0,97

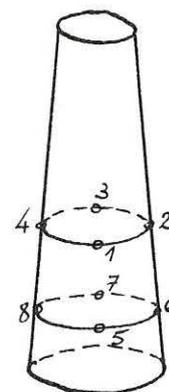


Tableau 4.4 : Comparaison des rigidités locales obtenues lors de 2 essais consécutifs, sur des arbres préalablement sollicités (KI est multiplié par 10^{+6})

(NB. Pour une direction donnée, les valeurs de KI sont indiquées uniquement pour les points situés dans le plan de flexion imposé).

Le comportement local de l'arbre n° 11 est considéré comme élastique puisque tous les rapports $\frac{KI1}{KI2}$ sont compris entre 0,99 et 1,06.

Pour l'arbre n° 12, l'hypothèse d'un comportement local élastique n'est vérifié que pour un point sur deux. En effet, pour l'un ou l'autre des plans de flexion imposés, seuls deux rapports $\frac{KI1}{KI2}$ attestent de la

reproductibilité de l'essai de flexion puisqu'ils sont compris entre 0,95 et 1,05.

conclusion :

Ces résultats ne permettent pas de confirmer dans tous les cas, l'hypothèse d'un comportement élastique de l'arbre en flexion ; on ne peut pas dissocier clairement les comportements de l'encastrement de celui de l'arbre.

Après accommodation préalable, les arbres fléchis de façon artificielle, ne présentent pas forcément un comportement local élastique

4.1.5.3. Reproductibilité du comportement d'arbres sans accommodation préalable

Contrairement aux deux arbres précédents, les arbres étudiés ici n'ont pas fait l'objet d'accommodation préalable.

a) cas des structures au comportement linéaire

Sur 33 cas examinés, on rencontre les situations suivantes :

	$K_1 < K_2$	$K_1 = K_2$	$K_1 > K_2$
$K_{l1} < K_{l2}$	3	0	1
$K_{l1} = K_{l2}$	8	14	3
$K_{l1} > K_{l2}$	1	2	1

(indice : 1 = premier essai ; 2 = deuxième essai)

Parmi les 33 couples d'essais (66 cas) où la linéarité des diagrammes "charge-flèche" et "moment-déformation" est bonne, 14 couples ont des rigidités globale et locale identiques d'un essai à l'autre.

Parmi les autres couples (33-14), les diverses situations observées attestent d'un comportement non reproductible, qui s'explique dans la majorité des cas.

On rencontre ainsi des arbres pour lesquels la rigidité globale obtenue lors du 2^{ème} essai différent de celle obtenue lors du premier essai : le comportement du composite "terre + racines" peut expliquer cette situation. Un "compactage" de la partie comprimée de l'encastrement au cours du premier essai entraîne une rigidification de l'encastrement ; on a alors $K_1 < K_2$. La situation opposée ($K_1 > K_2$) peut s'expliquer par une destabilisation de l'encastrement à la première flexion ; au deuxième

essai, la rotation de la base se fait plus facilement que lors du premier. (Cette situation se rencontre lorsque l'on veut retirer un piquet du sol, en le soumettant à des moments de flexion successifs).

b) cas des structures au comportement non linéaire

le bilan des situations est le suivant :

	$K_1 < K_2$	$K_1 = K_2$	$K_1 > K_2$
$K_{I1} < K_{I2}$	3	0	0
$K_{I1} = K_{I2}$	3	2	1
$K_{I1} > K_{I2}$	0	0	0

(indice : 1 = premier essai ; 2 = deuxième essai)

Des 9 couples d'essais présentant un diagramme "charge-flèche" linéaire par morceau, 2 couples ont un comportement élastique. Pour les autres essais (4 sur 9) les explications avancées précédemment restent valables.

4.1.5.4. Influence de l'ordre des sollicitations sur les rigidités globales et locales

Il s'agit de contrôler si le fait d'avoir fléchi un arbre suivant une première direction, n'entraîne pas systématiquement, lors de l'essai suivant la direction opposée, une augmentation apparente de rigidité globale entre le 1^{er} et le 2^{ème} essai. La question se pose également pour des directions d'essais orthogonales. Les tableaux 4.5 et 4.6 permettent de répondre à cette question.

En ce qui concerne la rigidité globale, rien de net n'apparaît entre des directions latérales 1 et 2, 1 et 4, 3 et 4. Le fait d'avoir sollicité la structure suivant la direction 1 n'entraîne pas systématiquement, l'observation d'une rigidité ($K_1^{3^{\circ}\text{dir}}$) plus faible que la rigidité ($K_2^{3^{\circ}\text{dir}}$) puisque l'on rencontre cette situation sur 4 arbres seulement (n°1,2,5,10). La remarque reste valable pour les directions 2 et 4, où l'on rencontre cette fois 5 arbres (n°1,2,4,5 et 9), pour lesquels, on a ($K_1^{4^{\circ}\text{dir}}$) inférieure à ($K_1^{4^{\circ}\text{dir}}$).

L'influence d'un essai suivant une direction sur le comportement de la structure suivant une direction opposée ou latérale, semble spécifique

de l'arbre et de son encastrement. Des essais complémentaires seraient nécessaires pour éclaircir cet aspect du comportement global de l'arbre.

		direction		1		2		3		4	
		ordre		1	2	3	4	5	6	7	8
N° arbre	1			+	-			-	+	-	+
	2			+	-	=	=	-	+	-	+
	3			-	+	-	+	+	-	+	-
	4			-	+	=	=	+	-	+	-
	5			=	=	-	+	-	+	-	+
	6			-	+	+	-	=	=	=	=
	7			-	+			=	=	=	=
	8			+	-	-	+	=	=	+	-
	9			=	=	=	=	=	=	-	+
	10			=	=	=	=	-	+	=	=
	11			+	-					=	=
	12			-	+					=	=

Tableau 4. 5 : Comparaison des rigidités globales entre essais et entre directions

		direction		1		2		3		4	
		ordre		1	2	3	4	5	6	7	8
N° arbre	1			=	=			=	=	=	=
	2			=	=	=	=	=	=	=	=
	3			-	+	=	=			+	-
	4			=	=	=	=	=	=	-	+
	5			=	=	+	-	=	=	-	+
	6			=	=	=	=			=	=
	7			-	+			=	=	=	=
	8			=	=	-	+	+	-	=	=
	9			=	=	=	=	=	=	=	=
	10			=	=	=	=	=	+	=	=
	11			=	=	=	=			+	-
	12			=	=	=	=	-	+	=	=

Tableau 4. 6 : Comparaison des rigidités locales entre essais et entre directions

signification des signes employés: [=] indique que les rigidités sont les mêmes entre le 1^{er} et le 2^e essai ; [-] ou [+] indiquent que la rigidité du 1^{er} essai est inférieure ou supérieure à celle du 2^e (pour une même direction)

L'ordre des sollicitations successives est sans influence sur les rigidités locales observées ; cela ne semble pas surprenant puisque la rigidité locale est une qualité intrinsèque du tronc (cf § 4.1.5.1)

On s'aperçoit également que dans le tableau 4.6, le nombre de signe [=] est plus important que dans le tableau 4.5. ; ceci est lié à la reproductibilité de l'essai qui est meilleure au niveau local d'une section qu'au niveau global de la structure (cf. § 4.1.5.1)

4.1.6. Conclusions

L'essai de flexion statique d'un arbre permet de définir une rigidité globale et locale à partir des diagrammes respectifs "charge-flèche" et "moment imposé-déformation longitudinale"

Le comportement élastique global ou local de la structure n'est pas systématique. Certaines situations se comprennent à partir du comportement probable de l'encastrement : l'encastrement pouvant prendre différentes formes, à savoir "rigide", "élastique" ou "rigidifiant". Toutefois, à partir de l'essai tel qu'il est réalisé, on ne sait pas distinguer l'encastrement "élastique" de l'encastrement "rigide". Dans le cas d'un encastrement élastique, on ne peut dissocier la part liée au tronc de celle liée à l'encastrement.

L'effet des cycles préliminaires d'accommodation, n'est pas clairement établi ; l'ordre de sollicitation est sans influence sur la rigidité locale observée. L'essai de flexion suivant une direction donnée, n'influence pas systématiquement le comportement global de l'arbre fléchi suivant une direction opposée.

Des essais complémentaires, portant notamment sur le comportement individuel de l'encastrement d'une part et celui de la tige d'autre part, permettraient de mieux comprendre le comportement global de la structure.

Pour la suite de l'analyse, lorsque les rigidités (globale ou locale) sont les mêmes lors des deux essais, une seule valeur est retenue. Dans le cas où les rigidités diffèrent d'un essai à l'autre, c'est la rigidité la plus élevée, qui est retenue.

4.2. Rigidité globale de la structure

Il s'agit ici de vérifier la modélisation proposée au chapitre 2. Cette validation nécessite des données relatives à la géométrie (données dendrométriques) et au matériau (module d'élasticité longitudinal E_{L4}) ; ces données sont explicitées au chapitre 3. Différentes modélisations sont proposées dans un ordre de complexité décroissante pour tenter de proposer un débouché d'utilisation pratique de l'essai de flexion.

4.2.1. Première modélisation : cône avec poids du houppier

Dans cette première modélisation, le tronc de l'arbre est assimilé à un cône de section elliptique dont les dimensions de base sont celles relevées sur la tige à 1,30 mètre et à la cote $Z = L$.

Ce cône est constitué d'un matériau homogène avec un module d'élasticité égal au module moyen trouvé sur l'ensemble des éprouvettes relative à chaque arbre.

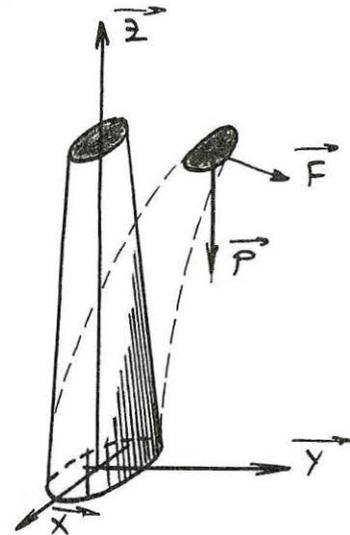


Figure 4.5 : Fût assimilé à un cône elliptique

L'encastrement est de type rigide, ce qui n'impose aucun déplacement de la section de base.

Le poids de la partie située au dessus du point d'application est pris en compte.

A partir de ces hypothèses, et en accord avec la modélisation du chapitre 2, deux rigidités globales sont calculées à partir des deux diamètres de la section droite elliptique. Pour chaque arbre, elles sont comparées aux rigidités globales observées.

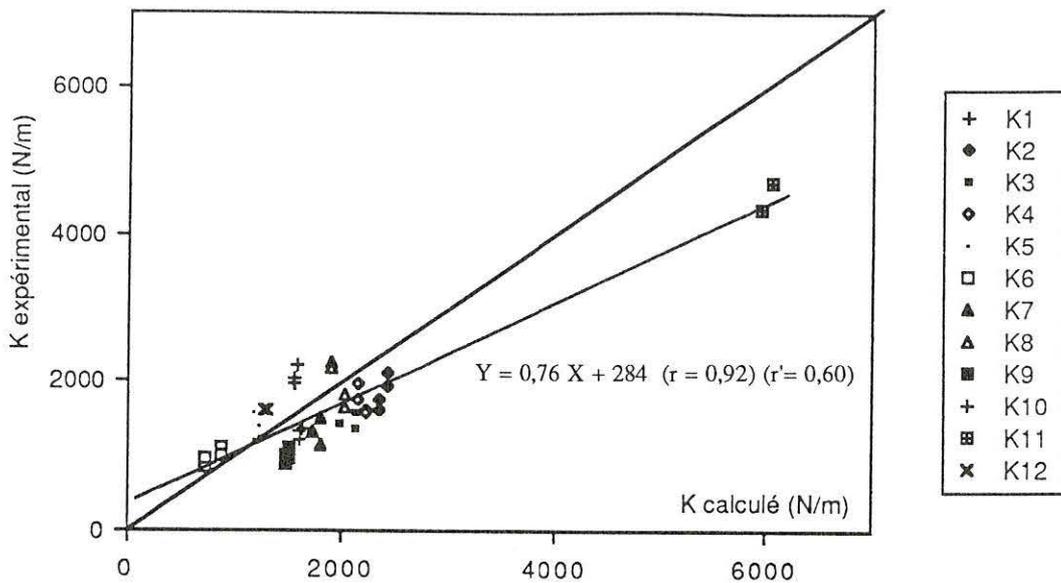


Figure 4.6 : Comparaison des rigidités globales évaluées et expérimentales dans le cas d'un fût assimilé à un cône chargé par le poids du houppier. (r coefficient obtenu sans les valeurs élevées) (NB : le détail des données figure au tableau "rigidité globale : K " en annexe 7)

Cette première modélisation permet d'évaluer correctement la rigidité globale du tronc puisque sur l'ensemble des individus, le nuage se répartit de part et d'autre de la bissectrice avec toutefois, chez certains individus une surestimation de la rigidité calculée. La position de la droite de régression obtenue sur l'ensemble des points, vient le confirmer. Le fût schématisé par un cône homogène, ne prend pas en compte les hétérogénéités du matériau et la géométrie réelle (empattement, évolution des sections avec la hauteur,...). La rigidité calculée est alors surévaluée.

La rigidité K élevée de l'individu n° 11 se comprend puisque cet arbre a les plus grandes dimensions, de plus le point d'ancrage est situé à 10m, hauteur inférieure à la mi-hauteur de l'arbre.

La prise en compte du caractère elliptique de certaines sections permet de comprendre la différence de rigidités observées entre des directions. Toutefois une analyse plus détaillée est nécessaire.

4.2.2. Effet du poids du houppier

Le comportement du tronc à la flexion, avec et sans houppier, est analysé sur les arbres n° 11 et n°12. Dans les deux cas, le houppier est supprimé juste au dessus du point d'application de l'effort.

L'analyse faite au paragraphe 2.3.4., montre que l'effet du poids du houppier représente 11% de la rigidité globale ; ceci, lorsque le poids et

l'effort imposé sont à la même cote. Cet effet est accentué lorsqu'on éloigne le centre de masse du houppier, du point d'application de l'effort. Les rigidités globales sont calculées avec et sans le poids du houppier ; le tronc est assimilé à un cône de section droite elliptique. Ces valeurs sont alors comparées à celles observées :

		calculé	observé
arbre n°11	K arbre entier	6050	4960
	K arbre sans houppier	6500	5310
	écart	+8%	+7%
arbre n°12	K arbre entier	1300	1535
	K arbre sans houppier	1470	1590
	écart	+16%	+4%

Tableau 4.7 : Rigidités globales évaluées et observées sur les arbres n° 11 et n° 12, avec et sans houppier

Dans les 2 cas, la rigidité globale observée du tronc sans houppier s'est révélée supérieure à celle obtenue lors de la flexion de l'arbre entier : l'écart est de 7% pour l'arbre n°11 et de 4% pour l'arbre n°12. L'effet du moment fléchissant lié au poids est supprimé et la différence va dans le sens attendu.

Pour l'arbre 11, bien que les valeurs de rigidité globale avec et sans houppier soient supérieures à celles observées, la différence apparente (8%) est proche de celle observée. Par contre, pour l'arbre 12, l'écart calculé (16%) est surévalué par rapport à celui observé (4%)

Au chapitre 3, (§3.2.3), on a vu que le centre de masse de l'arbre entier est situé en dessous de la mi-hauteur de l'arbre. De façon plus précise, pour les arbres 11 et 12, ces centres de masse sont respectivement situés à 9,05 m et 8,75 m, alors que les points d'application d'effort se situent respectivement à 10,00 m et 10,80 m, donc au-dessus de ces centres de masse. Aussi le manque d'information sur la cote du centre de masse de la partie située au dessus du point d'application de l'effort, nous pénalise dans l'analyse de la compréhension de l'effet du poids du houppier.

Conclusion

L'effet additif, non souhaité, du poids du houppier, sur le moment fléchissant imposé à mi-hauteur des "Peupliers" testé, est inférieur à 10 % ; Ceci est dû à la position du point d'application de l'effort vis à vis des centres de masse de l'arbre et du houppier. Aussi, si l'on désire évaluer la rigidité globale d'un arbre à 5% près, il faut prendre en compte le poids propre du houppier, qui introduirait sinon, une incertitude supplémentaire de 10% (dans une configuration d'essai analogue).

4.2.3. Variation de rigidité globale en fonction de l'orientation du moment imposé

Les arbres étant sollicités pour la plupart suivant 4 (3 ou 2) directions, dans ce qui suit, l'analyse des rigidités suivant ces différentes directions est présentée.

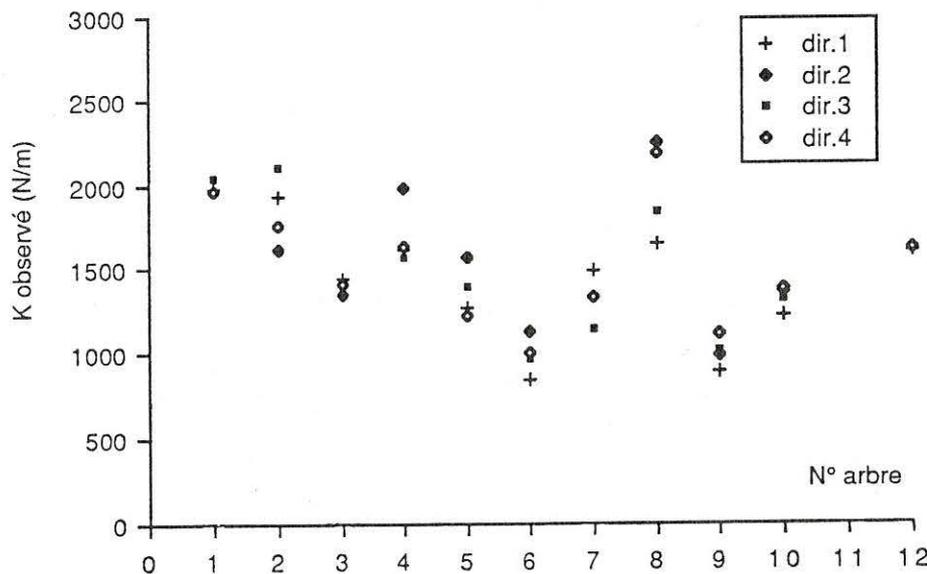


Figure 4.7 : Rigidités globales suivant différentes directions de sollicitation

(NB : le détail des données figurent au tableau "rigidité globale : K " en annexe)

Les arbres n° 1, 3, 9, 10 et 12 n'indiquent pas de comportement particulièrement différents lors de la flexion qui leur est imposée dans des plans en quadrature. Par contre, les arbres n° 2, 4, 5, 6, 7, 8 et 11 ont une ou deux directions pour lesquelles leur comportement diffère de celui obtenu suivant les autres directions. L'influence de singularités

géométriques et du matériau sont présentées dans les points 4.2.3.1 et 4.2.3.2 qui suivent.

4.2.3.1. Influence de singularités géométriques

Caractère elliptique de la section située à 1,3 mètre

les arbres n° 2, 8 présentent 2 directions de flexion pour lesquelles les rigidités apparentes obtenues sont significativement supérieures aux autres rigidités mesurées.

Pour un même fût théorique, les rigidités globales évaluées pour les points opposés d'un même plan de flexion sont identiques, $K_1 = K_3$ et $K_2 = K_4$. De plus le rapport $\frac{K_1}{K_2}$ (ou $\frac{K_3}{K_4}$) est égal au rapport des diamètres

de l'ellipse, élevés au carré ; nous avons alors $\frac{K_1}{K_2} = r^2$.

	$\frac{K_1}{K_2} = r^2$ évalué	$\frac{K_1}{K_2}$ observé	$\frac{K_3}{K_4}$ observé
arbre n° 2	1,07	1,22	1,29
arbre n° 8	0,89	0,72	0,82

Un décalage apparaît entre les rapports observés et ceux évalués. Cet écart peut être attribué au fait que les sections droites de ces arbres ne sont pas des ellipses parfaites, mais elles s'en rapprochent plus que d'une section circulaire ou d'une autre forme. De plus, la forme des sections droites d'une tige, évolue avec la hauteur ; sur l'échantillonnage d'arbres utilisés, elles deviennent plus circulaires, au fur et à mesure que leurs dimensions diminuent.

Singularité à la base : présence de contreforts

Sur les arbres n° 4 et n°5, la direction n° 2 présente une rigidité globale de 22% supérieure à la moyenne des rigidités observées suivant les autres directions.

Cet écart est dû à la présence d'un contrefort important à l'empatement de ces arbres. Lorsque ce contrefort est sollicité en traction, la rigidité du tronc est plus grande que lorsqu'il est comprimé.

Sur l'arbre n° 4, le contrefort est situé dans le plan de flexion (2-4), coté 2 ; son influence est donc nette, lorsqu' il est sollicité en traction. Les rigidités obtenues suivant les autres directions de flexion étant proche les unes des autres. Cette influence est d'autant plus nette, que le matériau de cette arbre est relativement homogène sur la couronne périphérique de la section située à hauteur d'homme. En effet, l'infradensité des quatre points en quadrature est de [275-267-267-266 (kg/m³)] et les modules d'élasticité E_{L4} obtenus sur éprouvettes sont de [7530-7450-6870-7330 (MPa)]

Sur l'arbre n°5, le contrefort important est situé entre les directions 2 et 3. Son influence se répercute sur la structure sollicitée suivant ces directions. La rigidité apparente de la structure est la plus élevée pour la direction 2, et dans une moindre mesure pour la direction 3 ; celles obtenues suivant les directions 1 et 4 sont les plus faibles.

Contrairement à l'arbre précédent, le matériau présente des hétérogénéités au niveau de la section droite située à 1,30 mètre, qui contribuent partiellement à la différence de rigidité observée.

Ces résultats, en accord avec les observations de Seens (in Grace, 1977), (sur 461"peupliers, 407 avaient des contreforts plus développés suivant la direction des vents dominants) permettent d'affirmer que le contrefort, contrairement à ce que laisse penser son nom, agit comme un hauban, tout au moins sur le "Peuplier".

4.2.3.2. Influence du matériau

Parmi les 6 arbres qui ont un comportement similaire suivant les différentes directions, les arbres n° 3 et n°12 , et dans une moindre mesure les n° 9 et n° 10, sont particulièrement inclinés dans le plan (1-3), la direction 1 étant celle de plus grande pente de la tige.

Ainsi, bien qu'il y ait présence de bois de tension, à une position privilégiée de la section - comme le laisse supposer les modules d'élasticités obtenus sur les éprouvettes issus de ces endroits de référence - la rigidité globale du tronc n'en est pas pour autant modifiée

; les zones de bois "opposé" et de bois "normal" contribuent également au comportement de la tige.

Compte tenu de ce résultat, la localisation de bois de tension dans une zone privilégiée de la tige ne peut donc être détectée, a priori, par un essai de flexion statique, au cours duquel, on mesure une flèche pour un effort donné.

conclusion

La description simplifiée de l'arbre testé en flexion statique, donne accès à la rigidité globale du fût. Celle ci dépend de la géométrie et du matériau.

Les paramètres géométriques sont dominants, mais on ne peut départager clairement l'influence de la géométrie de celle des "matériaux".

4.2.4. Autres modélisations : poids du houppier négligé

Dans un souci de simplification de l'écriture de la modélisation précédente, on propose dans ce qui suit, d'assimiler le fût de l'arbre, à un cône, ensuite à un cylindre. Dans l'un et l'autre des cas, le poids du houppier est négligé.

4.2.4.1 Rigidité globale du fût conique .

Les hypothèses concernant la géométrie, le matériau, et la condition d'encastrement sont identiques au cas précédent.

Le fût, ainsi schématisé, n'est pas chargé par le poids du houppier ; seul l'effort appliqué à la cote $Z = L$ intervient dans le bilan des efforts extérieurs.

Pour chaque fût homogène, comme précédemment deux rigidités globales sont calculées (une rigidité par diamètre de section droite) à partir de la définition donnée au §2.1.6.2. ce qui permet alors, de les comparer aux rigidités globales observées.

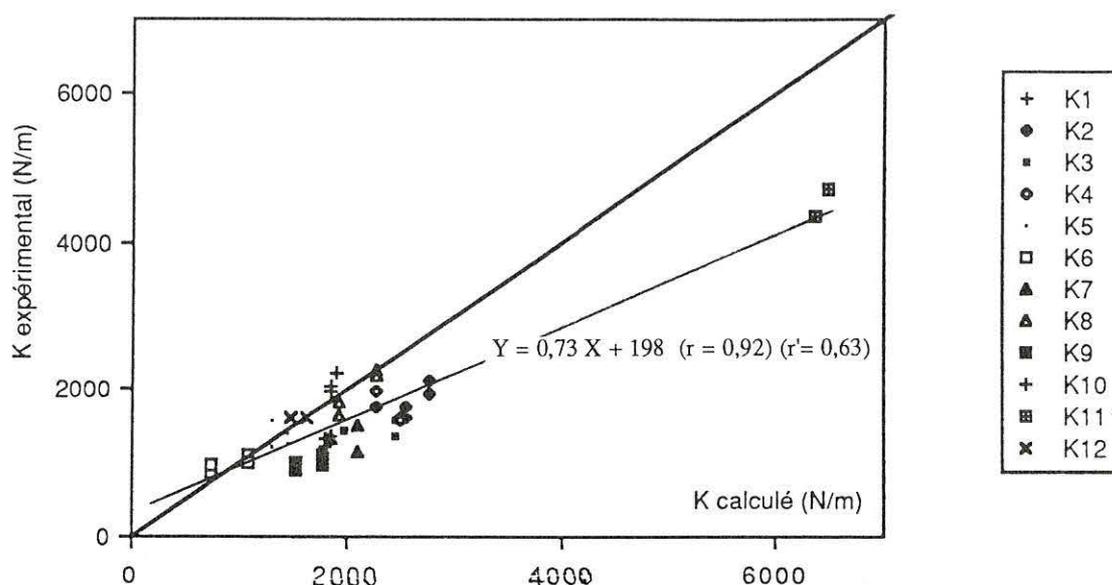


Figure 4.8 : Rigidités globales calculées et expérimentales dans le cas d'un tronc assimilé à un cône elliptique

(NB : le détail des données figurent au tableau "rigidité globale : K " en annexe 7)
 r' coefficient obtenu sans les valeurs élevées

Lorsque le tronc est assimilé à une poutre tronconique, la figure 4.8 met en évidence la surestimation des rigidités calculées par rapport aux rigidités observées. La pente de la droite de régression obtenue sur l'ensemble des points, indique un écart de 28% entre rigidités calculées et mesurées.

La dispersion des individus est légèrement supérieure à la dispersion obtenue dans le cas précédent ; les rigidités calculées sont comprises entre 740 et 6490 N/m.

Le forestier mesure habituellement un seul diamètre à hauteur d'homme, aussi dans un souci d'allégement de procédure d'essai, le fait de relever qu'une dimension ne change quasiment pas le résultat de la figure 4.8. En effet, avec un cône de section circulaire, le diamètre de base du cône serait un diamètre moyen et la rigidité globale évaluée serait comprise entre les deux valeurs trouvées avec la section elliptique.

4.2.4.2 Rigidité globale du fût cylindrique .

Toujours dans un souci de simplification, le tronc est assimilé ici, à un cylindre elliptique dont les diamètres sont ceux du tronc relevés à 1,3 mètre. Ce tronc est homogène, et parfaitement encasté (encastrement rigide). Le poids du houppier est toujours négligé. Comme

précédemment, on calcule alors pour chaque tronç deux rigidités globales à partir de la définition donnée au §2.1.6.2.

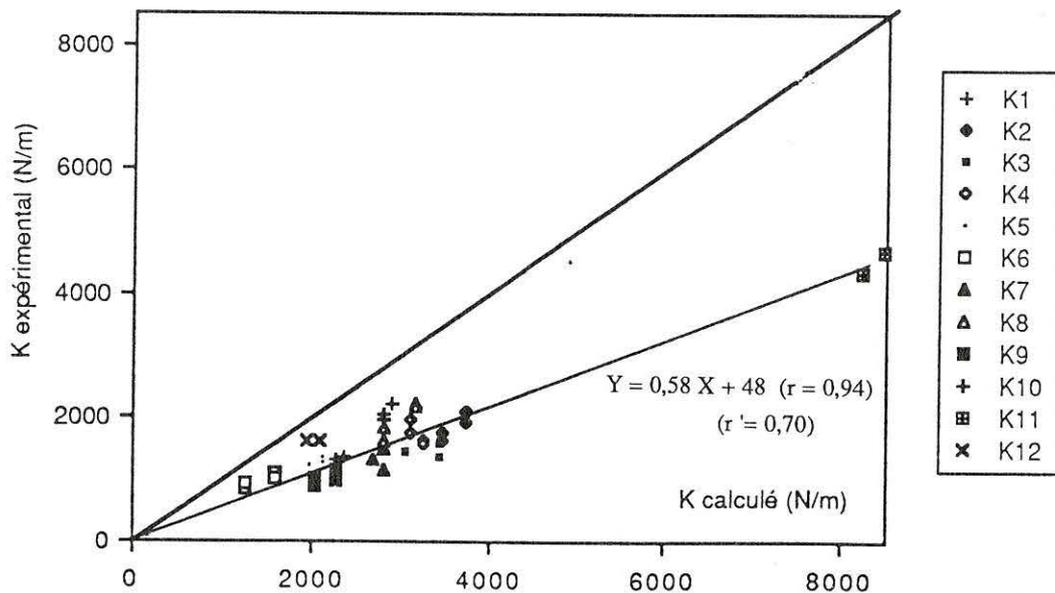


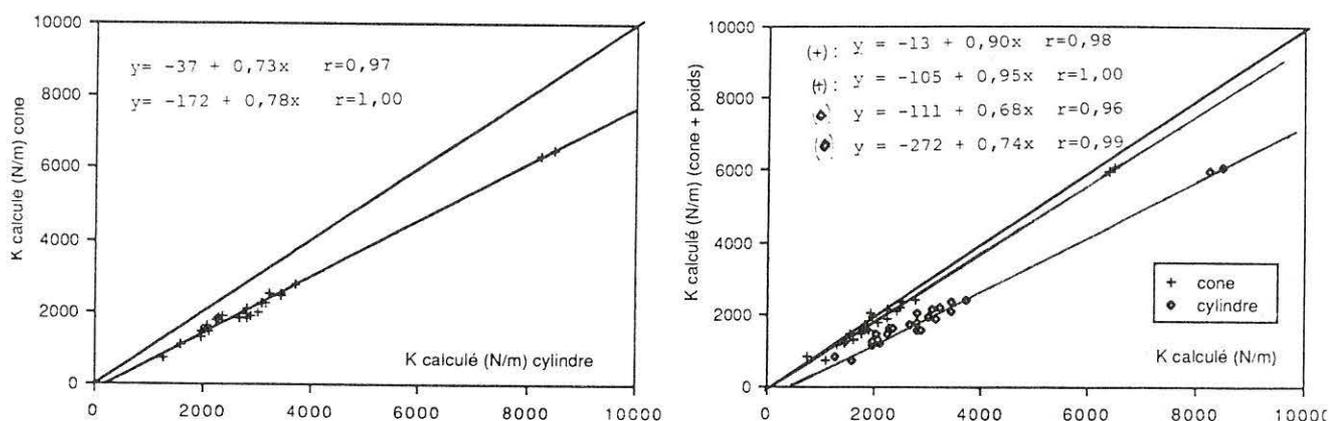
Figure 4.9 : Comparaison des rigidités globales théoriques et expérimentales dans le cas d'un tronç assimilé à un cylindre elliptique

Pour l'ensemble des arbres la rigidité globale calculée, est systématiquement surestimée. L'arbre n'est pas un cylindre s'appuyant sur la section droite circulaire de la hauteur de 1,3 mètre.

La pente de la droite de régression obtenue sur l'ensemble des points, indique un écart de 42% entre rigidités calculées et mesurées.

4.2.4.3 Liaison entre les rigidités globales calculées à partir des différents modèles .

La comparaison des K_{cyl} et $K_{c\hat{o}ne}$ donnait un rapport $\frac{K_{c\hat{o}ne}}{K_{cyl}}$ égal à 0,76 pour une conicité donnée (cf. §2.1.6.2) ; sur l'échantillonnage testé, la pente de la droite de régression obtenue sur le diagramme " $K_{c\hat{o}ne}$ - K_{cyl} " (figure 4.10-a) indique un rapport similaire (0,73, 0,78). Ce rapport donne accès à partir d'un calcul de rigidité sur un tronç assimilé à un cylindre, à la rigidité du tronç assimilé à un cône. On peut également relier les différentes rigidités $K_{c\hat{o}ne}$, K_{cyl} avec celles obtenues à partir du premier modèle proposé (figure 4.10-b), à savoir le cône chargé du poids du houppier.



4.2.5. Module d'élasticité obtenu à partir des rigidités globales expérimentales

A partir d'une rigidité globale observée, on se propose cette fois de calculer un module d'élasticité moyen de l'arbre sur pied.

Le fût de l'arbre est assimilé à un cylindre et à un cône. Les hypothèses géométriques et concernant le matériau sont les mêmes que celles adoptées dans les présentations précédentes : § 4.2.3.1 pour le cône et § 4.2.3.2 pour le cylindre. Dans les deux cas, le poids du houppier est négligé. Compte tenu de ces hypothèses, les modules d'élasticités sont calculés à partir des formules du § 2.1.6.2. Les diagrammes "E_L éprouvettes-E_L évalués" obtenus avec les modèles "cylindre" et "cône" figurent en annexe 8. Ils mettent en évidence la sous estimation des modules évalués, par rapport à ceux observés sur éprouvettes ; comme les résultats obtenus en 4.2.4.1 et 4.2.4.2 le laissaient prévoir.

Les valeurs obtenues, (cf.tableau "module E_L" en annexe 8), permettent de classer les individus par modules d'élasticité croissants. Le classement obtenu pour les troncs cylindriques d'une part et coniques d'autre part, sont alors comparés au classement effectué sur les modules d'élasticité obtenu sur éprouvettes de bois vert, issues de ces arbres.

Si la population d'arbres est partagée en deux groupes (6-6), les classements "cylindre" et "cône" sont quasiment similaires à l'exception de deux arbres situés à proximité de la limite fixée (n° 6 et n°10).

Les classements "cylindre" et "cône" concordent pour la moitié des arbres avec l'arrangement trouvé à partir des éprouvettes. Les deux mêmes arbres se retrouvent en position extrêmes, alors qu'aucune conclusion nette n'apparaît pour ceux situés en position intermédiaire.

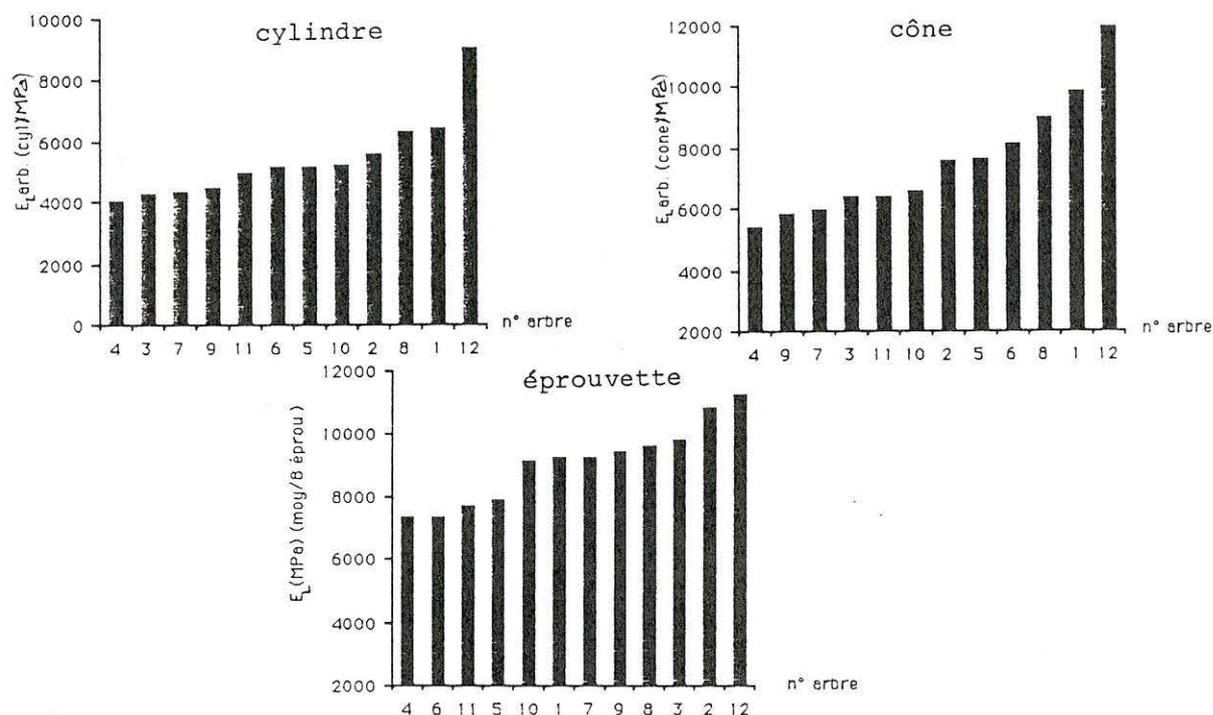


Figure 4.11 : Classement des arbres selon E_L moyens estimés avec les modèles "cône", "cylindre" et observés sur éprouvettes.

4.2.6. Conclusion

Un essai de flexion statique d'un arbre donne accès, à partir de certaines hypothèses géométriques, à un module d'élasticité moyen de l'arbre.

Il faut toutefois se garder de conclure de façon hâtive sur la qualité de la méthode proposée pour déterminer un module E_L du tronc. En effet, on vient de comparer des modules E_L moyen par arbre à des modules d'élasticité obtenus sur éprouvettes de dimension normalisées, exemptes de singularité et non nécessairement représentative de la qualité du fût. Il serait intéressant d'intercaler entre ces classements, un arrangement de E_L obtenu à partir de pièces de dimensions d'emploi.

L'analyse du comportement local, va permettre éventuellement, d'améliorer le classement et d'étayer la qualité de la méthode de qualification du bois dans l'arbre sur pied (d'un point de vue caractéristique mécanique).

4.3. Rigidité locale de la structure.

Il s'agit ici d'analyser les rigidités locales (KI) obtenues pour chaque arbre. Les rigidités locales expérimentales vont être comparées aux rigidités locales obtenues à partir de deux modélisations qui se distinguent par la prise en compte ou non, du poids du houppier.

Dans le même esprit que précédemment, des modules d'élasticité sont calculés à partir des rigidités locales expérimentales ; ces modules obtenus sont alors comparés à ceux obtenus sur les éprouvettes.

4.3.1. Première modélisation : cône et prise en compte du poids du houppier

Le fût est assimilé au cône qui est décrit au § 4.2.1 ; les conditions de chargement sont similaires. La rigidité locale KIP est alors calculée à partir de l'expression présentée au § 2.3.4 . $\left(KIP = \frac{M_{imp} E_z \cdot I \cdot 10^{+6}}{M_{imp+p} X} \right)$

Pour chaque arbre, 4 rigidités locales sont calculées, avec les rayons et les modules d'élasticités correspondant (4 rayons en quadrature, 4 modules obtenus sur les éprouvettes).

Les rigidités locales calculées, dont la dispersion se situe dans un rapport de 1 à 4, sont dans l'ensemble surévaluées par rapport aux rigidités observées. Cette surévaluation peut s'expliquer à partir des simplifications réalisées à différents niveaux de la modélisation ; elles concernent la géométrie (les sections droites à 1,30m ne sont pas des ellipses parfaites), le matériau, le moment fléchissant réel. La dispersion observée permet un classement des arbres par ordre de rigidités locales croissantes. Le classement présenté dans le tableau 4.8 est réalisé à partir des valeurs moyennes de rigidités locales.

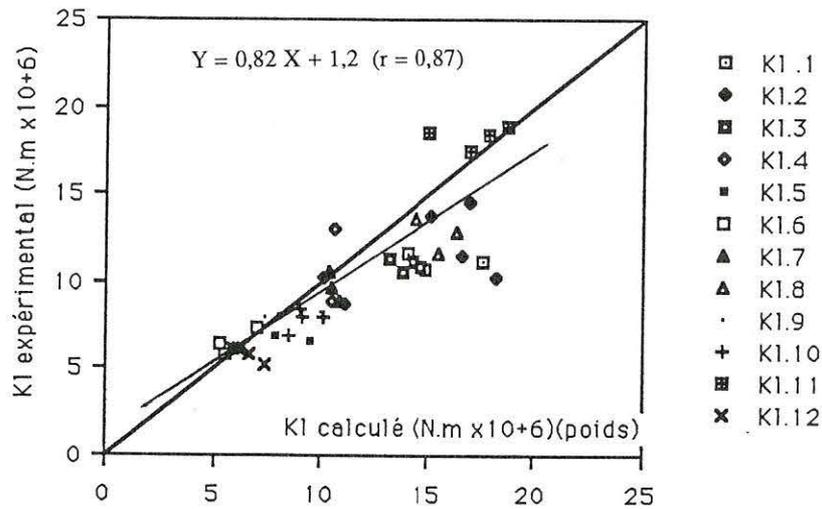


Figure 4.12 : Comparaison des rigidités locales expérimentales et calculées dans le cas d'un tronç assimilé à un cône chargé par le poids du houppier

(NB : Le détail des données figure en annexe 6 dans le tableau "rigidité locale : KI". Les rigidités relatives aux arbres 11 et 12 sont corrigées par un facteur de 1,5 .(cf § 3.4.3.4))

Klcal.	6	12	5	9	10	4	7	3	8	1	2	11
Klobs.	12	6	5	10	9	7	4	3	1	2	8	11

Tableau 4.8 : Classement des arbres par ordre de rigidités locales calculées et observées croissantes. Le nombre indiqué correspond au numéro de l'arbre.

Ce classement est satisfaisant dans la mesure où 3 arbres se retrouvent à la même position, alors que les autres, sont permutés d'une place excepté le n° 8 qui est décalé de 2 places.

En adoptant une démarche analogue à celle suivie pour la rigidité globale, regardons ce que l'on obtient en choisissant une modélisation d'écriture plus simple.

4.3.2. Deuxième modélisation : cône ou cylindre sans poids du houppier

Le tronç est assimilé à un cône ou à un cylindre de section elliptique, sans chargement du poids du houppier. KI est calculé à partir de la

formule (2.11) située au § 2.1.6.2 $\left(KI = \frac{E_z \cdot \pi r^2 A^3 10^{+6}}{4} \right)$.

Compte tenu, que l'on néglige le moment fléchissant lié au poids du houppier, on peut s'attendre à ce que l'écart entre les rigidités locales calculées et observées, soit supérieur à celui trouvé dans la configuration précédente.

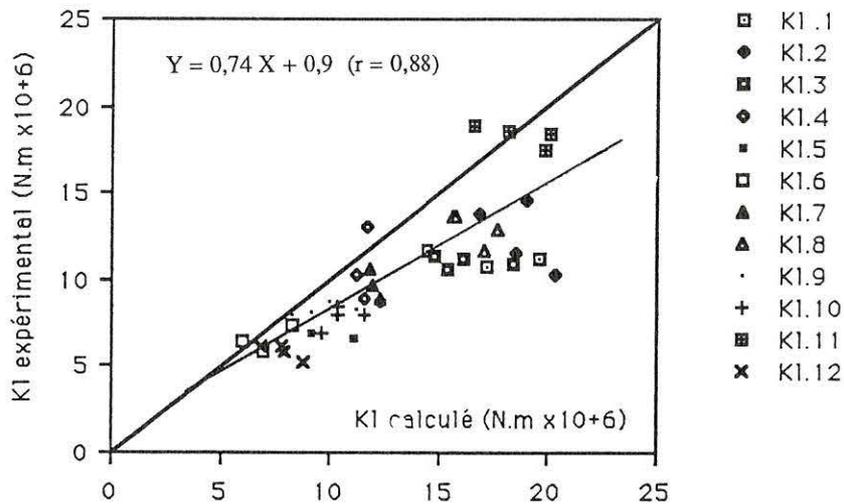


Figure 4.12 : Comparaison des rigidités locales expérimentales et calculées dans le cas d'un tronc assimilé à un cône (ou un cylindre) de section elliptique
(NB : Le détail des données figurent en annexe dans le tableau "rigidité locale : KI")

Le classement des arbres par ordre de rigidités locales croissantes obtenu à partir de cette modélisation est identique au précédent excepté pour les individus n° 11 et 2 qui sont permutés.

L'analyse qui vient d'être présentée, montre que négliger le poids, entraîne une augmentation apparente de la rigidité locale du fût. Les essais réalisés sur les arbres 11 et 12, avec et sans houppier, vont permettre de vérifier expérimentalement ce qui est avancé plus haut. La vérification ne peut malheureusement se faire que pour quelques points. En effet, les arbres sans houppier n'ont été fléchis que suivant une seule direction.

Sur les points où la comparaison peut se faire, la différence apparente entre les rigidités locales observées, entre les deux situations (avec et sans houppier) confirme ce que l'analyse prévoyait.

arbre	point	KI évalué (N.m x10 ⁶)		KI observé (N.m x10 ⁶)	
		avec houppier	sans houppier	avec houppier	sans houppier
11	1	16,6	18,8	18,8	-
11	3	15,0	18,2	18,6	-
11	5	15,9	17,3	15,2	21,6
11	7	15,7	19,0	18,6	21,1
12	1	5,9	6,8	6,1	8,7
12	3	6,6	7,9	5,9	7,6
12	5	6,2	7,2	6,2	6,6
12	7	8,4	7,0	5,9	-

Tableau 4.9 : Rigidités locales calculées et observées sur les arbres 11 et 12, avec et sans houppier. (Les rigidités locales présentées sont corrigées par un facteur de 1,5 .(cf § 3.4.3.4))

4.3.3. Liaison entre la rigidité locale et le matériau

Les expressions de la rigidité locale d'une section ($KI = \frac{E_L \cdot \pi r^2 A^3 \cdot 10^6}{4}$;

$KIP = KI \left(\frac{M_{imp.}}{M_{imp.} + M_{poids}} \right)$) montre qu'elle est directement liée au module d'élasticité $E_L = E_Z$.

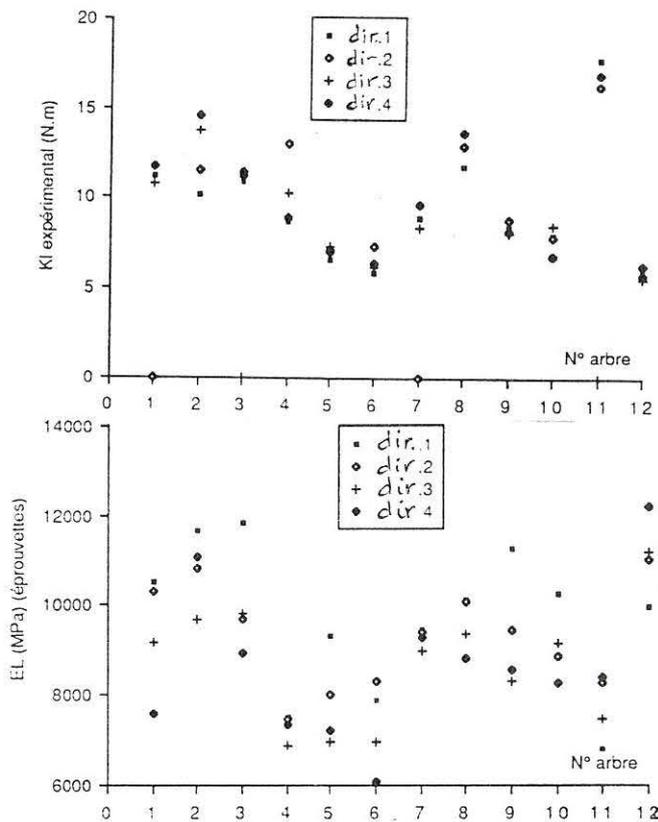


Figure 4.13 : Variation des rigidités locales et des modules d'élasticité E_L en fonction des différentes directions

Aussi, il s'agit de voir si cette rigidité locale d'une section droite peut renseigner sur la nature du matériau, notamment s'il est plus ou moins rigide ; ceci permettrait éventuellement de détecter la présence ou non, de bois de tension au niveau de la section étudiée.

Au chapitre 3 (§.3.5.3.2), on a vu qu'une relation d'ordre liait les différents modules d'élasticité E_L , observés sur les éprouvettes d'un même arbre ; les modules les plus élevés se retrouvaient suivant les directions 1 ou 4 .

Si l'on met en regard des distributions de E_L , celles des rigidités locales observées, on ne retrouve pas ces relations d'ordre. (cf figure 4.13)

Ce n'est pas toujours le bois le plus rigide qui se déforme le moins. Outre l'idée de décalage angulaire des points de mesure, qui entrainerait une erreur sur la déformation longitudinale maximale, il faut ajouter le fait que la rigidité locale telle qu'est définie, traduit le comportement de la section de la tige ; les différents matériaux (bois normal, bois de réaction et bois opposé) associés à l'inertie, contribuent à ce comportement sous le chargement imposé.

Sur l'échantillonnage utilisé, un relevé de rigidité locale à partir d'un essai de flexion, ne permet pas de localiser du bois de réaction au niveau d'une section droite de tige, tout au moins dans une couronne périphérique.

4.3.4. Calcul du module d'élasticité local à partir des rigidités locales observées

Les rigidités locales (KI) observées permettent de calculer des modules d'élasticité locaux de l'arbre sur pied à partir des formules suivantes :

$$KI = \frac{E_z \cdot \pi r^2 A^3 \cdot 10^{+6}}{4} \quad \text{et} \quad KIP = KI \cdot \left(\frac{M_{imp.}}{M_{imp.} + M_{poids}} \right) .$$

Les valeurs obtenues figurent en annexe 8, accompagnées des diagrammes "modules évalués-modules observés". Les modules évalués sont sous-estimés par rapport à ceux observés sur les éprouvettes ; les écarts sont toutefois moindres lorsque le poids du houppier est pris en compte.

Nous proposons dans ce qui suit, une démarche de classement des arbres analogue à celle proposée 4.2.5

Les classements par ordre croissant, des modules E_L obtenus à partir des rigidités locales ne coïncident pas avec celui obtenu à partir des modules d'élasticités observés sur éprouvettes.

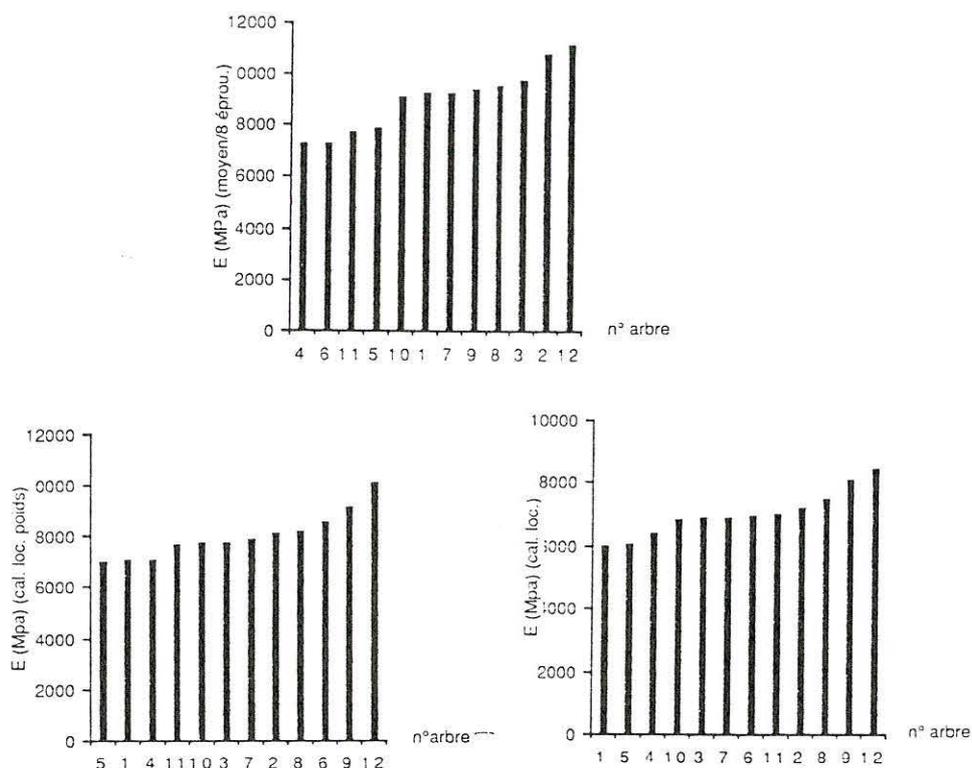


Figure 4.14 : Classements des arbres selon les modules élastiques moyen observés sur éprouvettes, et calculés à partir des rigidités locales observées

Toutefois, si l'on réalise deux groupes d'arbres de 6 individus chacun, alors, dans le meilleur des cas, 10 arbres sur 12 se retrouvent dans le même groupe lorsque l'on tient compte du poids. Lorsque ce dernier est négligé, 8 individus sont bien classés.

	groupe I	groupe II
module d'élasticité (E_L)		
observé sur éprouvettes	1, 4, 5, 6, 10, 11	2, 3, 7, 8, 9, 12
évalué à partir de KIP	1, 3*, 4, 5, 10, 11	2, 6*, 7, 8, 9, 12
évalué à partir de KI	1, 3*, 4, 5, 7*, 10	2, 6*, 8, 9, 11*, 12

Les individus indicés d'une étoile, sont ceux qui ont changé de groupe au cours du classement.

Nous proposons dans ce qui suit, deux autres méthodes d'évaluation du module d'élasticité, basée sur la mesure d'infradensité.

4.4. Autres méthodes d'estimation du module d'élasticité E_L dans l'arbre, basées sur la mesure d'infradensité

Deux classements complémentaires à partir de mesures d'infradensités sont proposés. Un premier concerne les infradensités mesurées sur les petits échantillons parallélépipédiques prélevés dans les éprouvettes de flexions (§3.5). Le second est obtenu à partir des infradensités mesurées sur des carottes de sondage, prélevées dans les arbres à l'occasion d'une étude précédente (voir §3.1) ; 2 carottes avaient été prélevées à cœur, l'une du côté estimé "tendu" et l'autre côté "neutre" du tronc.

Dans ces deux classements, une infradensité moyenne est sensée représenter l'infradensité du tronc.

	groupe I	groupe II
infradensité éprouvette	4, 5, 6, 8*, 10, 11	1*, 2, 3, 7, 9, 12
infradensité carottes	4, 6, 7*, 8*, 10, 11	1*, 2, 3, 5*, 9, 12
module d'élasticité (E_L)		
observé sur éprouvettes	1, 4, 5, 6, 10, 11	2, 3, 7, 8, 9, 12

Les infradensités obtenues à partir des carottes de sondage permettent de classer correctement 8 arbres sur 12. Ceci confirme la qualité de cette méthodologie de sélection, peu traumatisante, mise au point et largement utilisée par la S.R.Q.B. de Champenoux.

Le classement obtenu à partir des infradensités obtenues sur des échantillons d'éprouvettes, prélevées dans les billes de pied des arbres, est satisfaisant puisque 10 arbres sur 12 sont bien classés. Malgré la qualité de ce résultat, la méthode n'est pas intéressante puisque destructive. Elle confirme seulement la bonne liaison infradensité - module d'élasticité longitudinal, pour des éprouvettes de bois vert (cf. § 3.6.2.2 et les diagrammes en annexe 8.)

4.5. Conclusion

La rigidité K observée lors de la flexion d'un arbre, permet de calculer un module d'élasticité longitudinal moyen du fût alors que la rigidité KI donne accès à un module d'élasticité d'une section de ce même fût. Si

l'on se réfère à un classement d'arbres, effectué à partir des modules E_L obtenus sur éprouvettes, la détermination de la rigidité Kl est préférable à celle de la rigidité globale K puisque la première (Kl) permet de regrouper correctement 10 individus sur 12 (en tenant compte du poids), contre 6 individus sur 12 avec la seconde (K).

La méthode proposée ici, pour relever la rigidité locale (Kl) se rapproche de celle proposée par Koizumi (1987), qui détermine également un module d'élasticité du bois d'un fût, à partir d'un essai de flexion statique. Un relevé de courbure locale, à hauteur d'homme, sur un tronc fléchi à l'aide d'une potence chargée par le poids propre de l'opérateur, permet d'évaluer un module d'élasticité local du fût. Deux relevés suivant des directions perpendiculaires permettent de tenir compte du caractère elliptique de la section où s'effectue la mesure de courbure.

Les différentes méthodes, avec leurs performances respectives sont regroupées ci-dessous :

méthodes	arbres classés	opérations nécessaires
infradensité sur éprouvettes	10/12	abattage-épreuve-flexion-pesée
infradensité sur carottes de sondage	8/12	carottage-pesée
rigidité locale (avec poids)	10/12	flexion -mesure ϵ_L -dendro. section
rigidité locale (sans poids)	8/12	flexion -mesure ϵ_L -dendro. section
rigidité globale (cône)	6/12	flexion -mesure f-dendro. fût
rigidité globale (cylindre)	6/12	flexion -mesure f-dendro. section

Tableau 4.10 : Récapitulatif de différentes méthodes d'estimation de E_L du fût

La méthode de Koizumi (op. cit.) ne figure pas dans le tableau 4.10, faute de données sur ces performances. Bien que certaines méthodes soient comparables du point de vue du nombre d'arbre correctement classés, il n'en est pas de même de leur mise en œuvre.

Le comportement mécanique global ainsi que le comportement local d'une section droite de la tige, d'une douzaine d'arbres fléchis de façon artificielle peuvent se comprendre en utilisant la "théorie des poutres" et des considérations de résistance des matériaux. Les résultats intéressants et originaux obtenus, permettent de tirer la conclusion générale et les perspectives qui suivent.

BIBLIOGRAPHIE

- * ADAMOVITCH L.L., 1970 - Engineering characteristics of canadian trees - centre of gravity and green weight of components of three conifers in interior British Columbia on poor growing sites.
Forest Management Institute. Information Report FMR.X82
- * AFNOR, 1982 - NF. C67-100. Supports pour lignes aériennes. Poteaux en bois - spécification
- * AFNOR, 1987 - N.F.B51-016. Flexion statique. Détermination du module d'élasticité en flexion statique de petites éprouvettes sans défaut
- * ARCHER R.R., 1986 - Growth stresses and strains in trees
Ed:T.E.Timmel. Springer Verlag
- * ARCHER R.R., BYRNES F.E., 1974 - On the distribution of tree growth stresses. Part I : An anisotropic plane strain theory.
Wood Science and Technology Vol.8 : 184-196
- * ARCHER R.R., WILSON B.F., 1970 - Mechanics of the compression wood response. I- preliminary analyses.
Plant.Physiol. 46,550-556
- * ARCHER R.R., WILSON B.F., 1973 - Mechanics of the compression wood response. II-on the location, action and distribution of compression wood formation.
Plant.Physiol. 51,777-782
- * AVRIL & al,1974 - Encyclopédie Vishay d'analyse des contraintes
Vishay-Micromesures
- * BAMBER R.K., 1979 - The origin of growth stresses.
Forpride Digest 8 : 75-79, 96
- * BAMBER R.K., 1987 - The origin of growth stresses : A rebuttal
IAWA Bulletin n.s.,Vol. 8(1) : 80-84
- * BOUCHON J.,1987 - Etat de la recherche relative aux dégats forestiers dus aux tempêtes.
R.F.F. numéro spécial : Les châblis : 301-312
- * BOULET-GERCOURT B., NEPVEU G., 1988 - Relation entre certaines propriétés du bois et les fentes des arbres sur pied chez *Abies grandis* (Lindl.)
Ann.Sci.For.,45(1), 33-52
- * BORDONNE P.A., OKUYAMA T.,1987 - Relationships between growth stresses and microfibril angle in cell walls. Communication IUFRO.S5.01.01-IAWA joint meeting Paris.
- * BOYD J.D.,1950 - The growth stresses. I : Growth stress evaluation
Aus. J. Sci. Res., B3, 270-293

- * BOYD J.D.,1985 - The key facteur in growth stress generation in trees : lignification or crystallisation
IAWA Bulletin 6(2) : 139-150
- * BRUNING E.F.,1976 - Tree Forms in relation to environmental conditions : an ecological viewpoint : Tree physiology and yield improvement
Cannell & Last - Academic Press - London- New York - San francisco
- * BUCUR V., ARCHER R.R., 1984- Elastic constants for wood by an ultrasonic method.
Wood Science and Technology, Vol.18, pp255-265
- * BUTTERFIELD, MEYLAN BA., 1980 - Three dimensional structure of wood. An ultrastructural approach
2rd Edition, Chapman and Hall
- * C.E.E., 1986 - Minimizing wind damage to coniferous stands. Løvenholm Castle, Denmark. March 3-7,
- * CINOTTI B., TAHANI N.1988- Influence de l'humidité du bois des chênes sur leur sensibilité à la gélivure.
Actes du colloque "comportement mécanique du bois"
G.S. "Rhéologie du bois"; Bordeaux 8-9 juin
- * CLELAND R.,1971- Cell wall extension
Ann.Rev.Plant.phys.: Vol.22 ; 197-222
- * C.T.B.A.,1984 - Les peupliers en structure. Cahier n° 123
- * DE REBOUL L.,1988- Influence des paramètres de structure et de position sur le module de rigidité en flexion statique (EL) dans le cas de l'épicéa commun (Picea abies Karst.)
D.E.A. Sciences du bois, I.N.P. de Lorraine, NANCY.
- * DE REFFYE Ph., EDELIN C., JAEGER M.,CABARTC., 1986 - Simulation de l'architecture des arbres
Naturalia monspeliensia - Colloque international sur l'arbre : 223-240
- * DOMINO R., 1982 - Technique de l'ingénieur. Généralité : câbles d'acier
T7 - A.2382
- * EL AMRI F.,1987 - Contribution à la modélisation élastique anisotrope du matériau bois-Feuillus et Résineux.
Thèse de Doctorat de l'I.N.P. de Lorraine
- * F.A.O.,1956 - Les peupliers dans la production du bois et l'utilisation des terres
F.A.O. Etudes des forêts et des produits forestiers. N°12
- * FERRAND J.C., 1981- Recherche des solutions pratiques à apporter aux problèmes posés par les contraintes de croissance des arbres forestiers
Thèse de docteur-ingénieur, I.N.P. ed Lorraine. NANCY.
- * FOURNIER M., 1989 - Mécanique de l'arbre
Thèse de Doctorat de l'I.N.P. de Lorraine (à paraître)

- * GENEVAUX J.M., 1988 - Le fluage à température linéairement croissante : caractérisation des sources de viscoélasticité anisotrope du bois
Thèse de Doctorat de l'I.N.P. de Lorraine
- * GIBBS R.D., 1957- Patterns in the seasonal water content of trees. In The Physiology of Forest Trees
ed. by K. V. THIMANN
- * GILLIS P.P., 1973 - Theory of growth stresses
Holzforschung 27(6) 197-207
- * GIORDANO G., 1971- Tecnologia del legnio.
Vol.1 La materia prima
- * GRACE J., 1977- Plant reponse to wind
Academic Press, London, New York, San Francisco
- * GREENIDGE K.N.H., 1957 - Rates and patterns of moisture movement in trees.
In The Physiology of Forest Trees ed. by K. V. THIMANN
- * GRIFFIOEN K., 1973 - Investigation on the properties of poplar wood.
International Poplar Commission ; Firenze (Italy), 12-13 september
- * GUITARD D., 1987- Mécanique du matériau bois et composites
Cepadues-Editions
- * HALLE F., OLDEMAN R.A.A., TOMLISON P.B., 1978 - Tropical trees and forest.
Springer Verlag. Berlin
- * HEJNOWICZ Z., 1967 - Some observations on the mechanism of orientation movement of woody stems.
Amer.J.Bot.54(6): 684-689
- * ISEBRANDS J.G., BENDSEND D.W., 1972 - Incidence and structure of gelatinous fibers within rapid-growing Eastern Cottonwood.
Wood and Fiber, vol4 : 61,71
- * JACOBS M.R., 1939 - Further studies on fibre tension
Aust. Comm. For. Bull. N°.24
- * JANKIEWICZ L.S., STECKI Z.J., 1976 - Some mechanisms responsible for differences in tree form : Tree physiology and yield improvement
Cannell & Last - Academic Press- London New York - San Francisco
- * KELLER R., 1979 - Premiers résultats d'une expérience d'élagage du peuplier I 214.
Annales des Sciences Forestières, 36 (1), 59-92
- * KOCH P., 1985 - Utilization of hardwoods growing on southern pine sites.
Agriculture handbook N°605.
Vol.1. The raw material
- * KOIZUMI A., UEDA K., 1986 - Estimation of the mechanical properties of standing tree by bending tests (I). Test method to measure the stiffness of a tree trunk
Mokuzai Gakkaishi, Vol.32, N°.9 : p.669-676

- * KOIZUMI A., 1987- Studies on the estimation of the mechanical properties of standing trees by non-destructive bending test.
Research Bulletins of the College Experiment Forests Faculty of Agriculture, Hokkaido University
Vol.44. N°4 : 1329-14XX
- * KOLLMAN F., COTE W., 1968 - Principles of wood sciences and technology.
Springer Verlag. Berlin Heidelberg NewYork
- * KÜBLER H., 1959 - a. Studien über wachstumsspannungen des holzes. Erste mitteilung : Die ursache der wachstumsspannungen und die spannungen quer zur faserrichtung.
Holz Roh Werkst 17 : 1-9
- * KUBLER H., 1987 - Growth stresses in trees and related wood properties Forest Products Abstracts, N°3
- * LANGBOUR P., 1986 - Relation entre contraintes de croissance et la veine verte chez le merisier (*Prunus avium*).
Actes du séminaire interne du G.S. "Rhéologie du Bois" Nogent/Vernisson .
- * LANGBOUR P., FOURNIER M., GUITARD D., 1988 - Etat mécanique d'un tronc d'arbre forestier : rigidité à la flexion
Actes du colloque "Comportement mécanique du bois" G.S."Rhéologie du Bois". Bordeaux, 8-9 juin
- * LAROZE S., 1980 - Résistance des matériaux et structures.
Tome 2 : Théorie des poutres
Eyrolles - Masson
- * LARSON P.R., 1963 - Stem form development of forest trees
Forest Science Monograph, N°5
- * LENZ O., 1954 - Le bois de quelques peupliers de culture en Suisse. Annales de l'Institut fédéral de recherches forestières.
Vol.30 : 9-61
- * LENZ O., 1956 - Le bois des principaux peupliers et d'un saule indigènes en Suisse.
Annales de l'Institut fédéral de recherches forestières
Vol. 32 : 203-227
- * LENZ O., 1967 - Action de la neige et du gel sur les arbres de montagne, en particulier sur leur forme et l'anatomie de la tige
Institut Suisse de Recherches Forestières. Vol. 43 : 293-330
- * LETOUZEY R., 1972 - Manuel de botanique forestière. Afrique tropicale ; Tome 1
C.T.F.T. Nogent sur Marne
- * McMAHON T. A. , KRONAUER R. E., 1976 - Tree structure deducing the principle of mechanical design
J. Theor. Biol. Vol.59, 443-466
- * MAMADA S. , KAWAMURA Y., YASHIRO M., TANIGUCHI T., 1984 - The strenght of plantation Sugi trees
Mokuzai Gakkaishi Vol.30, N° 7, 530-537

- * MARIAUX A., 1981- Structure fine de bois tropicaux dans différents cas de contraintes résiduelles de croissance : étude des Wapa, Eperua sp.pl. en Guyane française
Compte-rendu de fin d'étude D.G.R.S.T
- * MARTLEY J.F. 1928 - Theoretical calculation of the pressure distribution on the basal section of a tree.
Forestry, Vol.2,N°1 : 69-72
- * MARVIN R.P., 1987 - Structural properties of second-growth Douglas-fir logging spars
American Society of Agricultural Engineers, Vol.30, N°1 65-69
- * MAYER H., 1987 - Wind-induced tree sways
Trees 1 : 195-206
- * METZGER, 1894 - Der Wind als maßgebender faktor für das Wachstum der Bäume
Mündener Forst. Hefte (Berlin) 3 : 35-86
- * MONTIES B. et al., 1980 - Les polymères végétaux. Biochimie appliquée. Edition Gauthier Villars
- * NAKATANI H. and al., 1984 - Deflection and resistance performance of tree stems subjected to snowloads in Sugi stands
Mokuzai Gakkaishi Vol.30, N°.11, 886-893
- * NEPVEU G., 1984 - La variabilité de la qualité du bois chez les Peupliers. Quelques résultats récents de la recherche
Conférence à l'E.N.I.T.A. Gradignan, 4-8 juin
- * NEPVEU G., BARNEOUD Cl., POLGE H., AUBERT M., 1985 - Variabilité clonale des contraintes de croissances et de quelques autres propriétés du bois dans le genre populus
Annales de Recherches Sylvicoles : 338-357
- * NOEL M. , BOCQUET A., 1987 - Histoire et technologie du bois de la préhistoire à nos jours. Hachette
- * OKUYAMA T. , KIKATA Y., 1975 - The residual stresses in wood logs due to growth stresses
Mokuzai Gakkaishi Vol.21, N°6 : 335-341
- * OKUYAMA T. , KIKATA Y., 1981 - The generation process of the growth stress and residual stress.
XVII th World Congress IUFRO,Japan
- * OKUYAMA T., 1986 - The growth stresses in reaction wood
XVIII th WORLD CONGRESS IUFRO, Ljubljana
- * ONO T., NORIMOTO M. , 1984 - On physical criteria for the selection of wood for sound boards of musical instruments Rheol. Acta 23, 652,656
- * OSSENBRUGEN P.J., PETERS M.A., SHIGO A.L., 1986 -Potential failure of a decayed tree under wind loading
Wood and Fiber Science,18(1),168-186
- * PARDE J., 1980- Forest biomass
Forestry Abstracts : vol.41 ; N°8 ; 341-362

- * PARDE J. et BOUCHON J., 1988 - Dendrométrie
2° édition, publication ENGREF. NANCY
- * PETTY J.A., WORRELL R., 1981- Stability of coniferous tree stems in relation to damage by snow
Forestry, Vol.54,N°.2,115-128
- * POLGE H., 1960 - Sensibilité relative du Sapin pectiné et de l'Epicéa commun aux coups de vents
Revue Forestière Française. N°10, 637-642
- * POLGE H. , ILLY G. ,1967 - Observations sur l'anisotropie du Pin maritime des Landes.
Ann. Sci. For., 24(3), 205-231
- * POLGE H., 1969 - Densité de plantation et élagage de branches vivantes, où, pourquoi, quand, comment élaguer ?
Rev. Forest. Fr. XXI, N°spécial "sylviculture"
- * POLGE H., 1985 - Influence de l'élagage sur la duraminisation, la production de bois de tension et quelques autres propriétés du bois de Peuplier l214
Ann. Sci. For., 42(3), 283-296
- * PRESTON R. D., 1964 - Structural and mechanical aspects of plant cell walls with particular reference to synthesis and growth
In Formation of wood in forest tree ; 169-188
New York Academic Press
- * PYLES M.R., PUGH E.V., 1987 - Two-dimensional analysis of logging tail spars
Forest Science, Vol.33, N° 4, 971-983.
- * PYLES M.R., AMMENSON J.E., MANN J.W., 1988 - The flexure behaviour of second-growth Douglas-fir spars
Forest Products Research Vol.38(5), 58-62
- * ROBARDS A.W., 1969 - The effect of gravity on the formation of wood
S Prog.Oxf.57; 513-532.
- * ROTTMANN M., 1985 - Schneebruchschäden in Nadelholzbeständen.
D. Sauerländer's Verlag , Frankfurt a.M.
- * RUARK G.A., MARTIN G. L., BOCKHEIM J.G., 1987 - Comparaison of constant and variable allometric ratios for estimating Populus tremuloides biomass
Forest Science. Vol.33(2), 294-300.
- * SCHNIEWIND A.P., 1962 - Horizontal specific gravity variation in tree stems in relation to their support fonction
Forest science 8,(2),111-118
- * SEICHEPINE J.L., 1980 - Mise au point d'une méthode expérimentale destinée à l'identification de la matrice des complaisances élastiques des solides anisotropes : application au matériau Bois.
Thèse de Docteur-Ingénieur,I.N.P. de Lorraine
- * TAHANI N., 1988 - Modélisation des contraintes internes dans les matériaux orthotropes cylindriques : séchage d'un billon soumis à un gradient radial d'humidité.
Thèse de Doctorat I.N.P. de Lorraine

- * THIBAUT B., 1988 - Le processus de coupe du bois par déroulage
Thèse de Doctorat d'Etat, mention "Science"
U.S.T.L. Montpellier
- * TELFER E. S., 1969 - Weight-diameter relationships for 22 woody plant species.
Can.J.Bot. 47: 1851-1855
- * VAFAI A.; FARSHAD M., 1986 - Modulus of elasticity of wood in standing trees
Wood Science Vol. 12, N°.2 : 93-97
- * WARDROP A.B., 1965 - The formation and the function of reaction wood. In : Côté
W.A., Jr (ed) Cellular ultrastructure of woody plants. Syracuse Univ. Press,
Syracuse, 373-390
- * WAUGH G. 1972 - Genetics and environmental influences. Newsletter 389. F.P.L.
CSIRO. Melbourne for Conversion
Eng. Group : 3-4
- * WINDIRCH J., 1936 - Der Aufbau des Waldbaumes nach statischer Grundlage
Tharandter Forstliches Jahrbuch 87(7) : 533-566
- * WILSON B.F., 1981 - The development of growth strains and stresses in reaction
wood.
In : Xylem cell development (ed.J.R.Barnet) : 275-290.
Castle house Publ.,Kent
- * YOSHIZAWA N., OKAMOTO Y., IDEI T., 1986 - Righting movement and xylem
development in tilted young conifer trees.
Wood and Fiber Science 18(4) : 579-589
- * ZIMMERMANN M.H., 1964 - The formation of wood in forest tree
Academic Press. New York,London
- * ZIMMERMANN M.H. ,1971 - Tree. Structure and function
Academic Press. New York, London

Listes des annexes

- Annexe 1 : Caractéristiques de la station et du peuplement
les "Peupliers" et leur bois
- Annexe 2 : Etats des déformations longitudinales, tangentiels et de cisaillement en
périphérie d'une section droite d'un fût fléchi artificiellement.
- Annexe 3 : Modules d'élasticité sur éprouvettes (E_L) (MPa)
Infradensités sur éprouvette (kg/m^3)
Taux d'humidité (H%)
- Annexe 4 : Données expérimentales des essais de flexion des arbres 1 à 10
- Annexe 5 : Données expérimentales des essais de flexion des arbres 11 et 12
- Annexe 6 : Rigidités locales (K_l) expérimentales et calculées avec et sans le poids du
houppier ($\text{N.m} \times 10^6$)
- Annexe 7 : Rigidités globales (K) expérimentales et calculées (N/m)
- Annexe 8 : Modules d'élasticité (E_L) sur éprouvettes et calculés à partir des rigidités
globales et locales observées (MPa)
- Annexe 9 : Données dendrométriques
- Annexe 10 : Variation angulaire d'infradensité, en périphérie d'une section droite de fût
située à hauteur d'homme

Annexe 1

Caractéristiques de la station et du peuplement.
Les "Peupliers" et leur bois

Caractéristiques de la station et du peuplement.

- Lieu géographique : Velaine sous Amance (Meurthe et Moselle)
6° 18' est - 48°46' nord
- Description de la station :
 - . altitude : 240 mètres
 - . nature du sol : argileux (hydromorphe à pseudogley)
 - . niveau de l'eau : 0-3 mètres
 - . vent dominant : sud ouest
- Description du peuplement
 - . 0-2 ans de pépinière ; plants issus de graines (croisement contrôlés)
 - . plantation avec espacement de 3,5 m x 3,5 m ou 7m x 7m
 - . populetum en bordure d'un taillis sous futaie (chênes-charmes)
 - . âge moyen 30 ans (plantation de 1957 à 1961)
- Origine des arbres utilisés

N° arbre	origine
1, 2	pop. tremula
3	pop. tremula x pop. alba
4 à 9	pop. alba x pop. tremuloïdes
10	pop. tremuloïdes x pop. nivea
11	I214
12	Robusta

Les "Peupliers" et leurs bois

Les "Peupliers" offrent certaines particularités qui, si elles les rapprochent de bon nombre de plantes cultivées (céréales...), leur donnent une nette originalité par rapport aux autres arbres producteurs de bois. En effet, les peupliers sont propagés essentiellement par voie végétative (bouturage) et non par graine, de plus, comme ils sont dioïques, l'hybridation est fréquemment appliquée.

Les améliorateurs qui cherchent la production en quantité et en qualité , utilisent ces aptitudes pour créer des clones ayant des caractéristiques écologiques différentes.

Parmi ces différents "Peupliers" , certains sont sujets comme d'autres essences, à présenter les inconvénients liés à la présence de bois de tension et de contraintes internes élevées qui occasionnent des fentes à l'abattage, des déformations des débits avant séchage, et la présence de bois qualifié de "pelucheux" posant des problèmes d'états de surface. (Waught 1972, Lenz 1954, Ferrand 1981, Nepveu 1984,...).

Jusque vers 1930, le bois de peuplier a été utilisé de façon importante en France, dans l'ameublement, la construction et l'emballage. Ensuite on l'a remplacé par des essences tropicales pour la fabrication des meubles et des contreplaqués, alors qu'en structure il a cédé sa place à certains résineux.

Actuellement, on se trouve dans une situation paradoxale ou la récolte potentielle de cette essence ne cesse de s'accroître (des reboisement intensifs de cette essence ont été réalisés ces trente dernières années et ils arrivent actuellement en production) alors que la consommation du bois de peuplier diminue dans les domaines où il donnait entière satisfaction (allumettes, emballages légers-caisserie, palettes). Cette diminution est liée à la substitution du carton et d'autres essences au peuplier.

Afin de relancer la consommation de cette essence, la recherche de nouveaux débouchés telle qu' une utilisation en structure, s'avère nécessaire.

Annexe 2

Etats des déformations longitudinales, tangentielles et de cisaillement en périphérie d'une section droite d'un fût fléchi artificiellement

Dans le chapitre 4, l'analyse de la rigidité locale est réalisée uniquement sur les déformations longitudinales. Sur les arbres n°11 et n°12, on dispose, en plus, des déformations tangentielles et de cisaillement en périphéries de deux sections du tronc situées à hauteur d'homme. Les données de cisaillement sont calculées à partir des déformations $\varepsilon_L, \varepsilon_T$ et ε_{45} enregistrées. Cette analyse apporte donc un complément sur le comportement du fût, par rapport à ce qui a été présenté plus haut. Les figures 3 à 6 indiquent les différentes déformations obtenues sur les arbres n°11 et n° 12. Nous les présentons sous forme de diagrammes "moment imposé- déformation".

1. Déformations longitudinales

Lorsque la structure est fléchie dans le plan (1-3) (respectivement dans le plan (5-7)), on enregistre bien un allongement de la partie en traction et un raccourcissement sur les points diamétralement opposés (partie en compression). La bonne linéarité du comportement local permet de présenter, pour un moment de flexion donné, les déformations longitudinales des points situés dans le plan de flexion.

N°arbre/dir.	couronne 1			couronne 2		
	traction	compression	écart	traction	compression	écart
11/1-3:5-7	+270	-	-	+330	-270	-18%
11/4-2:8-6	+260	-285	+8%	+295	-285	-4%
12/1-3:5-7	+890	-830	-7%	+760	-675	-11%
12/4-2:8-6	+850	-880	+4%	+830	-890	+8%

Tableau 1 : déformations longitudinales obtenues sur les deux couronnes des arbres n° 11 et n°12 pour un moment de flexion appliqué de 5000 N.m

Les déformations longitudinales observées pour des points situés dans le même plan de flexion sont du même ordre de grandeur avec toutefois, des écarts de 4% à 18% entre ceux situés en traction, et ceux situés en compression. Sur les figures 3 à 6, il apparaît également que certains points situés latéralement au plan de flexion, se déforment longitudinalement soit en traction ou en compression. L'ordre de grandeur est toutefois inférieur à celui enregistré sur les points situés dans le plan de flexion. Parmi les sources possibles qui peuvent engendrer des déformations sur les points latéraux au plan de flexion et des écarts entre les faces comprimée et tendue, on peut citer différents décalages angulaires ; au § 2.1.4.1, on montre qu'un décalage angulaire contribue à minimiser ou augmenter les déformations longitudinales observées.

Dans la configuration de l'essai adopté ici, il s'agit des décalages angulaires entre :

- les points d'une même section ; ces derniers sont théoriquement situés en quadrature, or le relevé de ces angles, montre que ces points ne sont pas réellement en quadrature.

angles (°)	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 1	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 5
N°11	87	90	91	92	86	91	88	95
N°12	90	93	88	89	83	105	83	89

Tableau 2 : angles (°) entre les différents points de mesure des sections
section 1 : points 1, 2, 3, 4 ; section 2 : points 5, 6, 7, 8

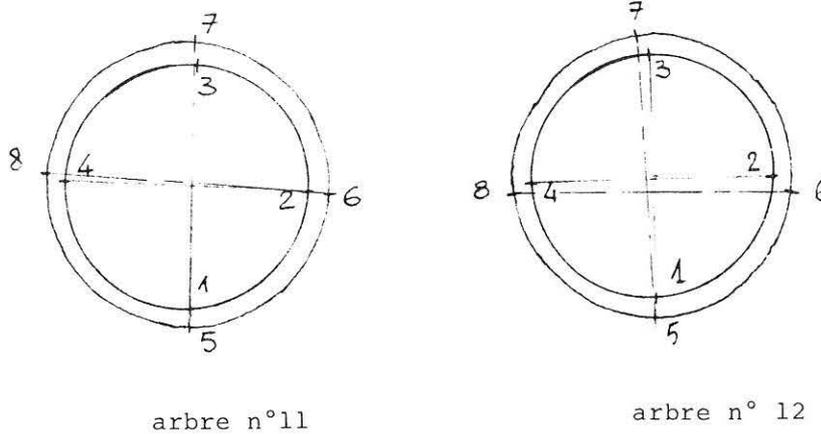


Figure 1 : Décalage angulaire entre les points de mesure des couronnes

- les deux couronnes de points des sections 1 et 2. Les points de la couronne inférieure étaient positionnés visuellement à partir de ceux de la couronne supérieure, aussi les couronnes étant relativement proche l'une de l'autre ($\approx 0,7$ mètre), un défaut d'appréciation de 1 à 2 cm entraîne un décalage angulaire de $0,8^\circ$ à $1,6^\circ$

- le plan de flexion appliqué et le plan (1-3 ; 5-7) ou (2-4 ; 6-8).

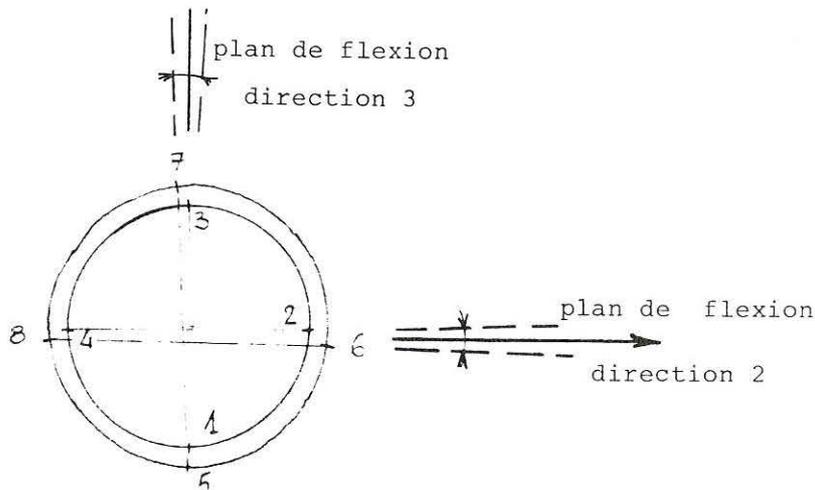


Figure 2 : Décalage angulaire du plan de flexion et des 2 couronnes

Le relevé de la direction du point d'ancrage était réalisé à l'aide d'une boussole. On choisissait alors l'arbre le plus proche de l'endroit souhaité. le point d'ancrage était situé à environ 25 mètres de l'arbre à solliciter,

aussi un écart de 2° à 3°, entre le plan de flexion souhaité et le plan réel, est tout à fait réaliste.

Il va de soit, que ces décalages peuvent aussi bien avoir un effet additif que compensatoire. Les relevés exacts des deux derniers décalages évoqués ci-dessus n'ont malheureusement pas été faits. Toutefois à partir de l'ordre de grandeur réaliste évoqué dans chaque cas, on peut comparer les valeurs de déformations calculées à celle observées.

Cette comparaison est faite, dans le cas de l'arbre 12 fléchi suivant la direction 2, avec les hypothèses suivantes :

- les angles entre chaque point sont ceux qui figurent dans le tableau 4.8
- les points 1 et 5 sont parfaitement superposés
- le plan de flexion, situé entre les points 2 et 3, est décalé de 5° par rapport au plan (2-4 ; 6-8)

points	1	2	3	4	5	6	7	8
ε_L observée	+25	-810	+105	+950	-30	-775	+180	+740
ε_L calculée	+70	-807	-30	+673	+68	-763	+40	+658
ε_L calculée*	0	-810	0	+675	0	-780	0	+660

Tableau 3 : déformations longitudinales ($\times 10^{-6}$) observées et calculées

(* : à titre indicatif, on indique dans la dernière ligne, les déformations calculées avec l'hypothèse de décalages angulaires nuls)

Il apparaît sur cet exemple que les différents écarts angulaires expliquent en partie les déformations longitudinales enregistrées sur certains points situés latéralement au plan de flexion imposé. On note également que pour les points situés à proximité du plan de flexion, l'influence relativement faible du décalage.

D'autres raisons peuvent expliquer le comportement des différents points de chaque section.

Il s'agit de l'allure de la section droite sur laquelle les mesures sont réalisées, les arbres en question ont une section qui n'est pas réellement circulaire ou elliptique.

L'hétérogénéité du matériau de la section, non prise en compte, avec une présence de bois de réaction localisée dans une zone particulière du tronc, entraîne un déplacement de la fibre neutre du tronc vers la zone la plus rigide, en l'occurrence la partie où il y a du bois de réaction.

Comparaison du comportement de deux sections du tronc.

Les sections sur lesquelles les mesures ont été réalisées sont distantes de 74 cm pour l'arbre n°11 et de 65 cm pour le n° 12.

Les figures 3 à 6 permettent de comparées les déformations longitudinales enregistrées sur les deux couronnes de points. Les points superposés et situés dans le plan de flexion (où à proximité), ont un comportement similaire. Les aspects géométriques (écarts angulaires, forme de section) et les hétérogénéités du matériau contribuent à la présence de déformations longitudinales sur les points proches du plan neutre

Certains auteurs (Metzger,1894, Windirsch,1936,...) ont avancée l'idée que l'association de la géométrie d'une tige avec les hétérogénéités du matériau est telle, que le tronc est probablement une poutre isocontrainte vis à vis des sollicitations naturelles qu'elle subit (vent, neige,...). Les résultats obtenus ne viennent pas infirmer cette idée.

Le comportement longitudinal du tronc en flexion statique est analogue à celui d'une poutre fléchie. L'expérience, en accord avec l'analyse, indique bien, les zones en traction, en compression et de plan neutre. Les hypothèses simplificatrices relatives à la géométrie et au matériau, suffisent pour comprendre le comportement longitudinale en périphérie d'une section droite de fût.

2. Déformations tangentielles

On enregistre un raccourcissement (resp. une élongation) tangentiel lorsque le point subit une élongation (resp. un raccourcissement) suivant l'axe L.

Le tableau 4 indique que le rapport $\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L}$ est compris, en valeur moyenne,

entre -0,2 et -0,8. Kollman (op.cit.) indique des valeurs du même ordre de grandeur, mais sur d'autres essences, également à l'état vert.

Le calcul est fait uniquement pour les points situés dans le plan de flexion lors d'un essai suivant une direction donnée.

Les déformations des points situés à proximité du plan neutre, sont relativement faibles (< 150 microdéf.) ou nulles.

points	1	2	3	4	5	6	7	8
arbre 11	-0,46	-0,21	-0,12	-0,80	-0,41	-0,19	-0,57	-0,40
arbre 12	-0,61	-0,80	-0,23	-	-0,46	-0,26	-0,42	-0,20

Tableau 4 : rapport $\left(\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L}\right)$ obtenu sur les points situés dans le plan de flexion

Si l'on met en regard les modules d'élasticité longitudinaux calculés à partir de KI observée, avec les rapports $\left(\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L}\right)$ obtenus pour les différents points, il apparait que deux points qui présentent des modules d'élasticité analogues, ne se déforment pas obligatoirement de la même façon, suivant le sens tangentiel. (tableau 5)

n° arbre		1 / 5	2 / 6	3 / 7	4 / 8
11	E_L (Mpa)	8380/6490	7860/7630	8180/7950	8300/723
11	$-\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L}$	0,45/0,4	0,2/0,2	0,1/0,6	0,8/0,45
12	E_L (Mpa)	10620/10270	10270/10550	10270/9700	8770/11040
12	$-\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L}$	0,6/0,45	0,8/0,25	0,1/0,4	--/0,2

Tableau 5 : Comparaison de E_{L4} (obtenu à partir de KI) et du rapport $\left(\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L}\right)$

La complaisance S_{TL} se calcule à partir de E_L et du rapport $\frac{\epsilon_T}{\epsilon_L}$, $S_{TL} = \frac{\epsilon_T}{\epsilon_L} / E_L$ Il

apparaît que les valeurs de $(-S_{TL})^{-1}$ que l'on obtient à partir des données du tableau 4.8 sont, pour une majorité de points, en accord avec les données de la littérature (Guitard.op.cit) sur le "peuplier".

$(10000 \text{ MPa} < (-S_{TL})^{-1} < 20000 \text{ MPa})$

3. Déformations de cisaillement

Elles sont calculées à partir des trois mesures de déformations réalisées sur chaque rosette (0-45-90) (le détail du calcul figure en annexe 2)

De manière générale, l'ordre de grandeur atteint par ces déformations est le même que celui des déformations tangentielles, c'est à dire quelques centaines de microdéformations.

Au chapitre 2, l'expression des déformations de cisaillement d'une section de tige fléchie artificiellement, est donnée par la formule suivante :

$$\epsilon_{XZ} = \frac{2}{3G_{XZ}} \frac{T_X(Z)}{S(Z)} (\sin^2 \lambda) ;$$

l'analyse indique donc que les déformations de cisaillement sont nulles dans le plan de flexion ($l=0$ et $l=p$), alors qu'elles sont maximums sur les points situés sur le plan neutre.

Les figures 3 à 6 montrent, en ce qui concerne les déformations de cisaillement (ϵ_{LT}), que bon nombre de points se comportent autrement que dans un essai de flexion pure. L'exemple le plus remarquable, concerne l'arbre 11, fléchi dans le plan (2-4) suivant la direction 2 (cf figure 3)

On distingue dans ce cas, 2 séries de points qui témoignent des déformations de cisaillement aux quatre points des deux couronnes. En admettant l'idée d'un décalage angulaire des points de mesure vis à vis des plans de flexion et neutre, qui entrainerait une erreur sur les déformations (ϵ_{LT}), il est nécessaire d'envisager le fait que la tige a subit non seulement un moment de flexion mais également un moment de torsion non souhaité. L'allure générale de cet arbre ne vient pas infirmer ce résultat ; cet arbre est incliné et flexueux dans le plan (1-3) (1 étant situé sur la face "tendue") ; aussi lorsqu'on le fléchit dans un plan orthogonal à ce plan naturel d'inclinaison, on conçoit intuitivement que la tige subisse de la flexion et de la torsion. Cet effet combiné flexion-torsion est moins marqué lorsqu'on le fléchit dans son plan d'inclinaison naturelle. Les déformations de cisaillement sont alors moins élevées.

Ce comportement singulier ne se reproduit pas pour l'arbre 12, qui lui est relativement droit mais légèrement incliné. Toutefois le comportement en cisaillement de certains points (cf. figures 5 et 6) atteste que la tige subit également l'effet de moment de flexion combiné à un moment de torsion.

Ces déformations de cisaillement (ϵ_{LT}) permettent théoriquement de calculer un module de cisaillement G_{LT} (cf § 1.3.2.3). Aussi, le manque d'information sur les moments de torsion, non souhaités et appliqués sur les tiges, ne permet pas de déterminer ces modules de cisaillement au niveau des différents points.

4. Conclusion

Les diverses déformations enregistrées au cours d'essai de flexion statique des arbres n° 11 et 12 ont apportée une contribution à l'étude du comportement d'une section droite de tige.

L'état mécanique en périphérie d'une section droite d'une tige sollicitée par un effort appliqué dépend :

- de l'intensité de l'effort appliqué et de la position de son point d'application vis à vis du centre de gravité de l'arbre ; compte tenu de l'élanement des tiges, le moment de flexion appliqué, auquel il faut ajouter des moments de flexion et torsion non souhaité, lié au poids propre de la structure et à sa forme sont les principaux efforts.

- des grandeurs géométriques de la section considérée (diamètres, formes particulières,...)

- des caractéristiques élastiques du matériau constitutif (ou des matériaux : bois normal, bois de réaction , bois opposé)

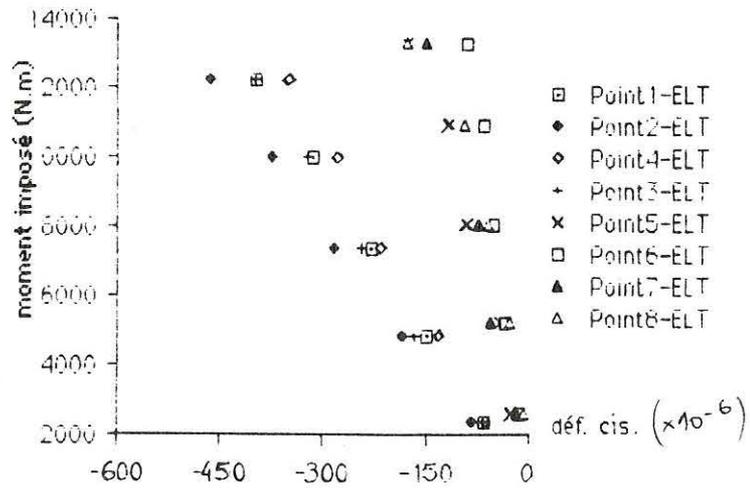
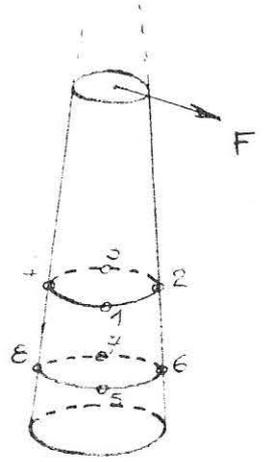
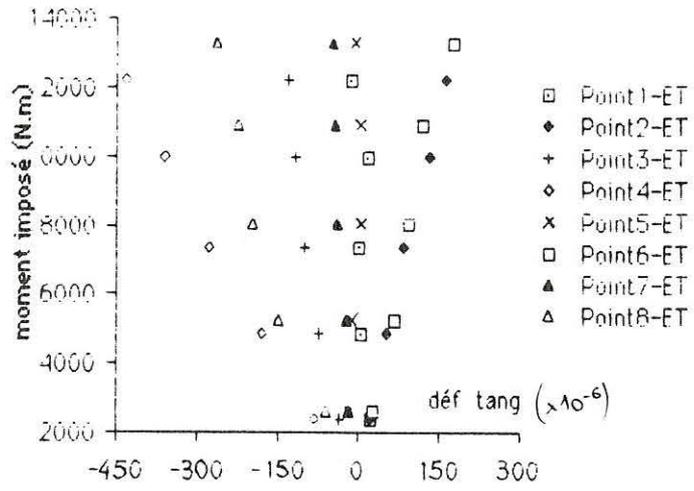
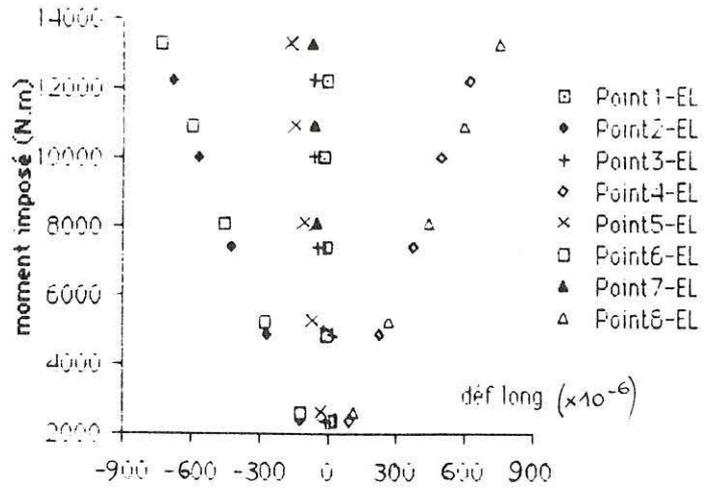


Figure 3 : déformations longitudinales, tangentielles et de cisaillement en fonction du moment appliqué sur l'arbre n°11, fléchi suivant la direction 2

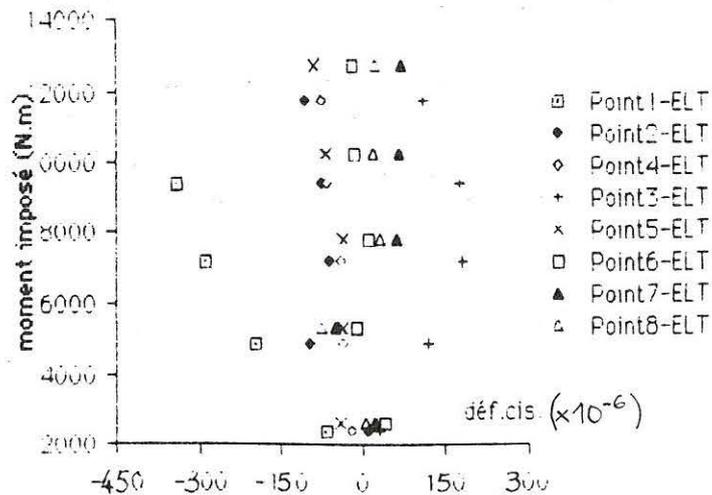
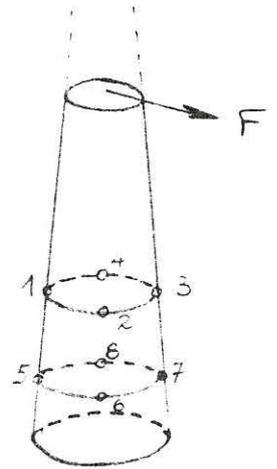
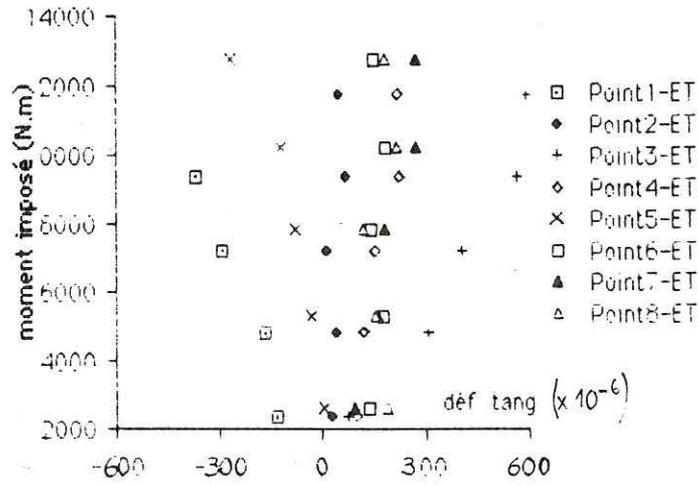
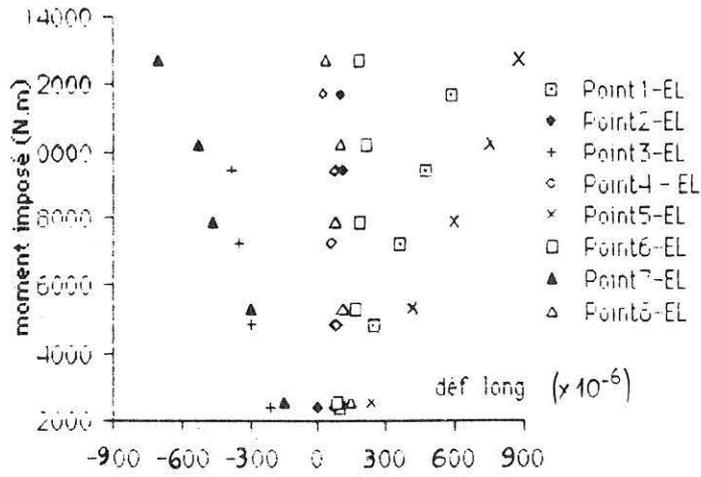


Figure 4 : déformations longitudinales, tangentielles et de cisaillement en fonction du moment appliqué sur l'arbre n°11, fléchi suivant la direction 3.

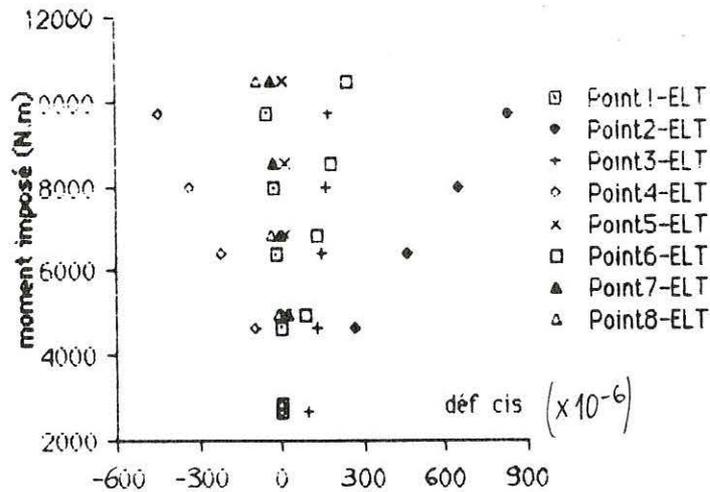
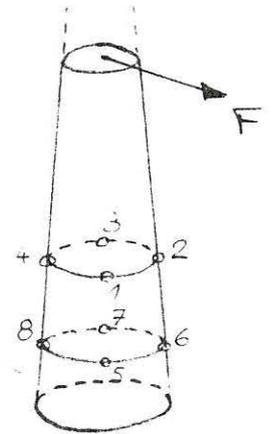
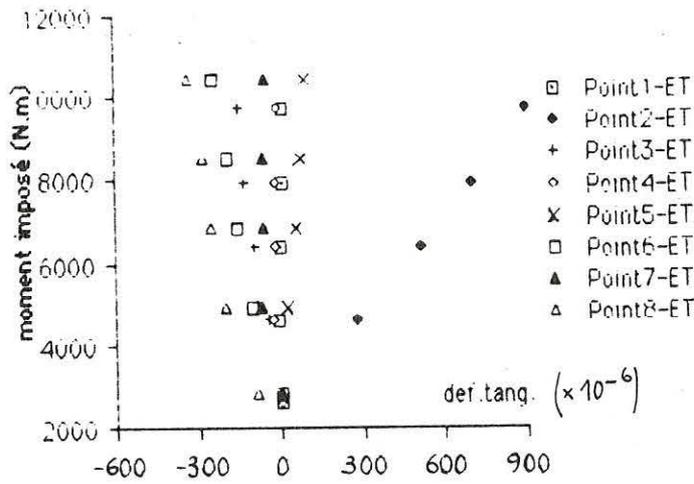
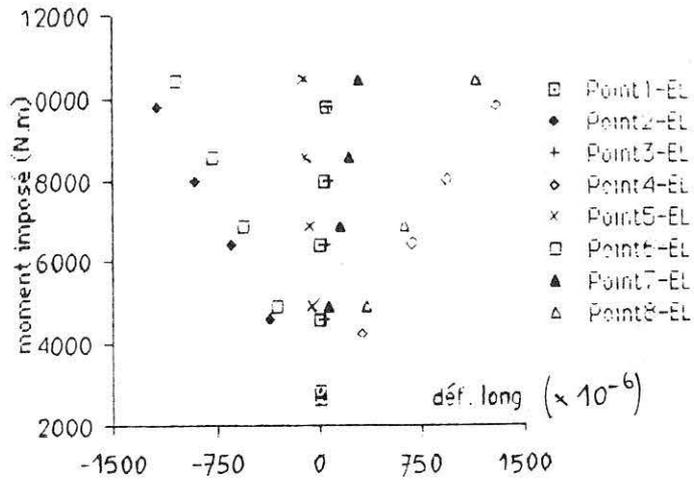


Figure 5 : déformations longitudinales, tangentielles et de cisaillement en fonction du moment appliqué sur l'arbre n°12, fléchi suivant la direction 2

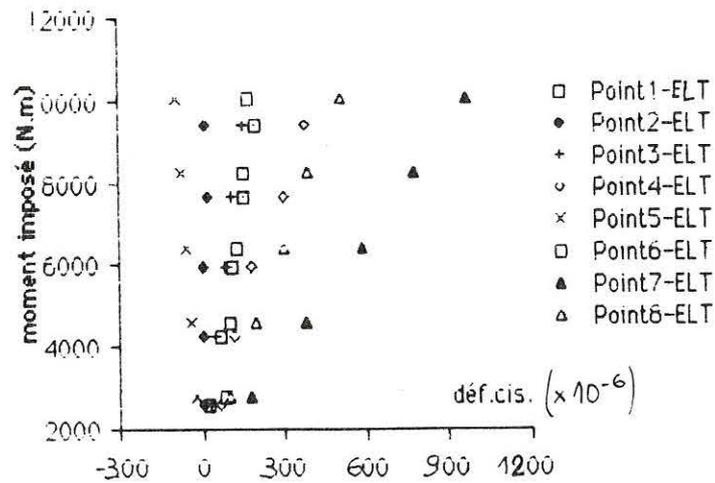
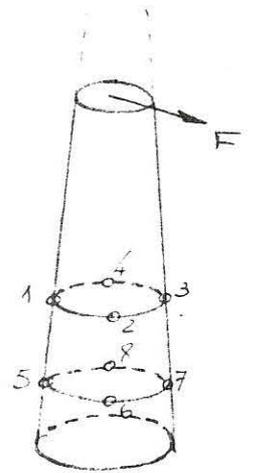
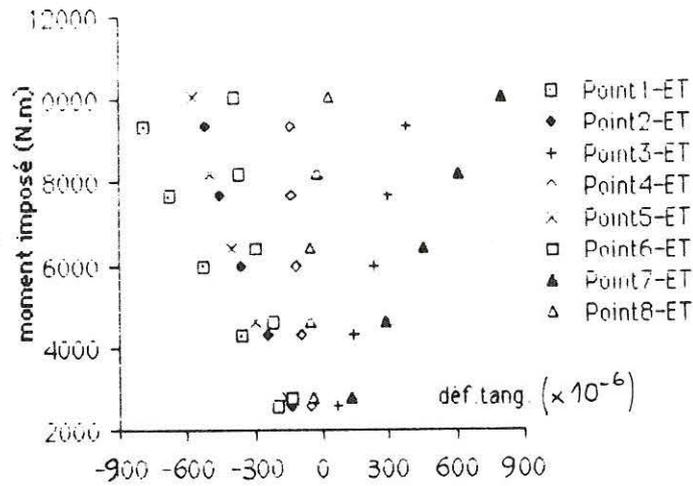
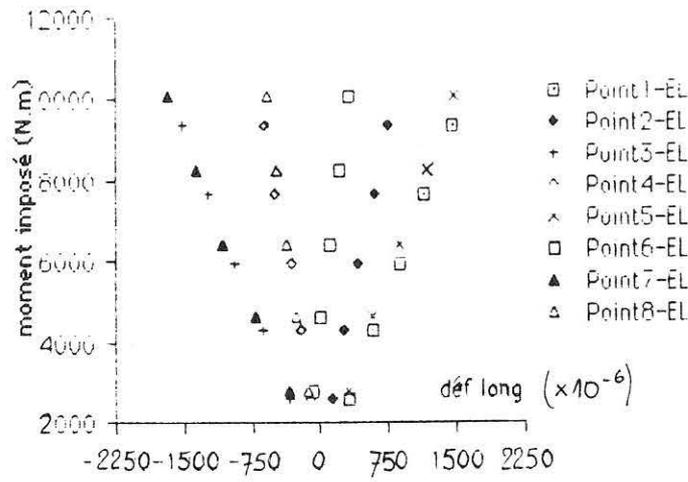


Figure 6 : déformations longitudinales, tangentielles et de cisaillement en fonction du moment appliqué sur l'arbre n°12, fléchi suivant la direction 3

Modules d'élasticités sur éprouvettes (E_L) (MPa)Infradensité (kg/m³)

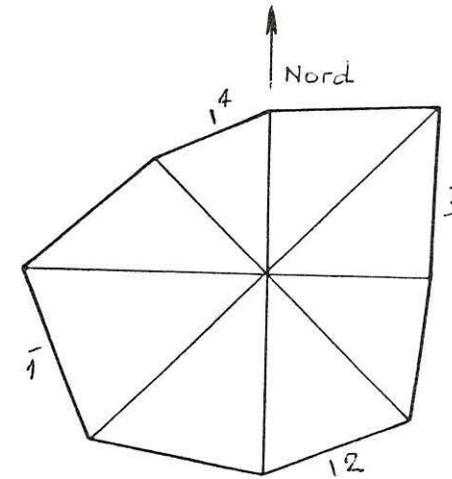
Taux d'humidité (%)

n° arbre	direction	infd (kg/m ³)	EL 3pt (MPa)	EL 4pts (MPa)	H%
1	1	362	9425	11700	69
1	1	388	7575	9400	64
1	2	344	9275	11500	67
1	2	349	7875	7950	69
1	3	378	7500	9300	98
1	3	367	7300	9050	71
1	4	349	6325	7850	93
1	4	361	5900	7300	65
2	1	360	9100	11300	57
2	1	381	9725	12100	64
2	2	361	9025	11200	66
2	2	359	8425	10450	59
2	3	375	8225	10200	67
2	3	362	7450	9250	57
2	4	364	8650	10750	65
2	4	369	9175	11400	72
3	1	381	9250	11500	52
3	1	362	9800	9750	57
3	2	335	7875	9750	60
3	2	348	7775	9650	52
3	3	354	8150	10100	60
3	3	337	7725	9600	51
3	4	330	7225	8950	52
3	4	322	7200	8950	58
4	1	273	6150	7650	83
4	1	276	6000	7440	58
4	2	265	6000	7440	91
4	2	265	6025	7470	126
4	3	266	5550	6900	79
4	3	267	5525	6850	70
4	4	266	6000	7450	75
4	4	263	5850	7250	74
5	1	346	7700	9550	162
5	1	346	7325	9100	125
5	2	312	6475	8050	83
5	2				
5	3	306	5875	7300	102
5	3	302	5325	6600	129
5	4	317	5950	7400	172
5	4	309	5700	7050	115
6	1	345	6150	7600	61
6	1	329	6575	8150	85
6	2	301	6600	8200	78
6	2	306	6800	8450	58
6	3	303	5675	7050	75
6	3	308	5600	6950	49
6	4	309	5150	6400	56
6	4	321	4675	5800	111
7	1	369	7475	9270	96
7	1	351	7725	9580	75
7	2	308	7450	9240	60
7	2	312	7700	9550	62
7	3	310	7300	9050	58
7	3	306	7200	8950	58
7	4	332	7200	8950	85
7	4	332	7725	9600	96

Annexe 3 (suite)
 Modules d'élasticités sur éprouvettes (E_L) (MPa)
 Infradensité (kg/m³)
 Taux d'humidité (%)

n° arbre	direction	infd (kg/m3)	EL 3pt (MPa)	EL 4pts (MPa)	H%
8	1	320	7800	9650	85
8	1	311	8525	10550	60
8	2	325	8225	10200	93
8	2	310	7975	9900	76
8	3	335	7950	9850	72
8	3	324	7150	8850	71
8	4	321	7200	8950	63
8	4	327	6975	8650	75
9	1	353	9175	11400	40
9	1	366	8950	11100	98
9	2	320	7700	9550	44
9	2	326	7500	9300	47
9	3	332	7025	8700	58
9	3	326	6400	7950	44
9	4	313	6800	8450	52
9	4	327	7050	8750	47
10	1	336	7900	9800	94
10	1	326	8600	10650	81
10	2	309	7300	9050	88
10	2	292	7000	8700	53
10	3	303	7350	9100	54
10	3	304	7350	9100	67
10	4	317	6875	8550	59
10	4	283	6500	8050	71
11	1	380	5705	8200	115
11	1	378	5250	8550	84
11	2	332	6300	7400	90
11	2	339	7000	7950	77
11	3	306	6000	6750	105
11	3	322	5800	6600	88
11	4	330	7100	8200	98
11	4	321	6450	7900	102
12	1	417	7550	10800	62
12	1	413	8450	10100	64
12	2	428	9200	10350	71
12	2	431	8500	10350	69
12	3	417	9100	11600	66
12	3				
12	4	447	8900	12450	64
12	4	444	9800		64

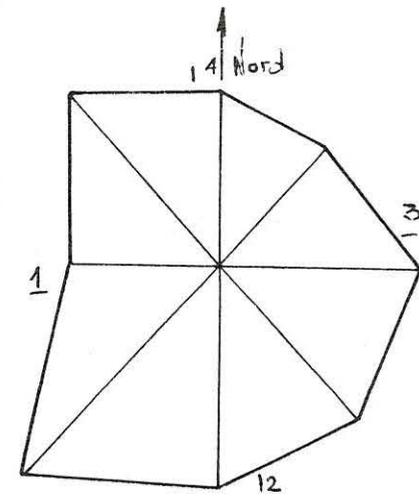
surface projetée du houppier
1,2,3,4 N° des directions d'essais



Hauteur (m)		Circonférence (m)			Masse (Kg)		$D_{1,30}^{1-3}$ (m)	$D_{1,30}^{2-4}$ (m)
totale	1ère grosse branche	base	1,30m	mi-hauteur	totale	au-dessus de L		
27,0	13,5	1,11	0,93	0,67	818	309	0,264	0,268

	F(daN)	Direction 1			Direction 2			Direction 3			Direction 4		
		l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)
E	30	15	22	140	/			15	23	200	18	21,5	300
S	50	25	22,5	380				25	23,5	420	30	22	448
S	70	33	23	580				35	24	680	40	23	590
A	90	44	23,5	740				46	24,5	820	53	24	860
I	110	55	24	960				55	25	995	66	25	1020
1													
E	30	16	22	160				14	23	220	14	21,5	270
S	50	27	22,5	400				24	23,5	460	24	22	450
S	70	37	23	620				34	24	670	33	23	650
A	90	44	23,5	780				43	24,5	860	41	24	870
I	110	57	24	920				52	25	1040	51	25	1010
2													

surface projetée du houppier
1,2,3,4 N° des directions d'essais



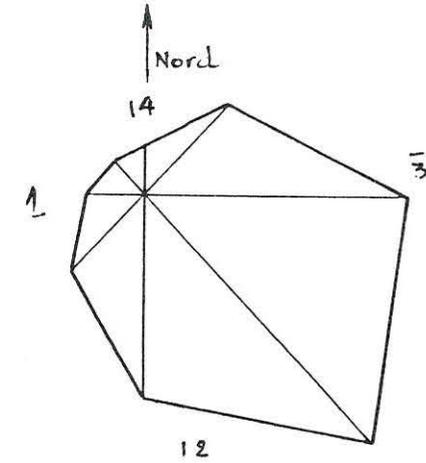
Hauteur (m)		Circonférence (m)			Masse (Kg)		$D_{1,30}^{1-3}$ (m)	$D_{1,30}^{2-4}$ (m)
totale	1ère grosse branche	base	1,30m	mi-hauteur	totale	au-dessus de L		
25,5	13,0	1,05	0,90	0,64	735	306	0,266	0,258

	F(daN)	Direction 1			Direction 2			Direction 3			Direction 4		
		l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)
E	30	14	23	320	18	21	240	14	25	270	18	26	175
S	50	25	23,5	535	31	21,5	460	25	25	465	30	26	310
S	70	34	24	755	44	22	580	36	25,5	580	42	26,5	445
A	90	44	24,5	935	55	23	780	46	26	740	53	27	580
I	110	54	25	1155	69	23,5	980	54	26	860	65	27	740
1													
E	30	15	23	260	17	21	220	13	25	260	17	26	180
S	50	27	23,5	455	30	21,5	420	23	25	420	28	26	300
S	70	38	24	655	43	22	570	32	25,5	500	41	26,5	460
A	90	49	24,5	855	54	23	750	41	26	680	51	27	600
I	110	58	25	1055	65	23,5	960	50	26	885	61	27	720
2													

Arbre 2 : Résultats des essais de flexion

Annexe 4

surface projetée du houppier
1,2,3,4 N° des directions d'essais



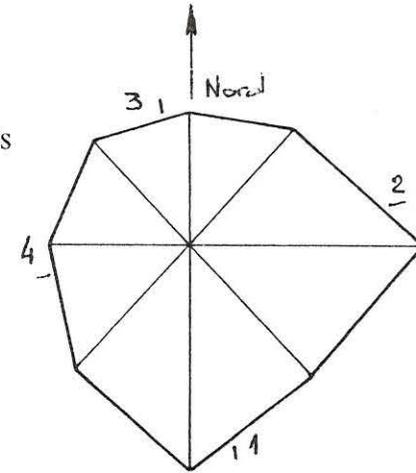
Hauteur (m)		Circonférence (m)			Masse (Kg)			
totale	lère grosse branche	base	1,30m	mi-hauteur	totale	au-dessus de L	$D_{1.30}^{1-3}$ (m)	$D_{1.30}^{2-4}$ (m)
25,0	12,5	1,02	0,85	0,59	660	260	0,246	0,264

	F(daN)	Direction 1			Direction 2			Direction 3			Direction 4		
		l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)
E	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	50	27	27	400	40	34,5	400	55	29	480	67	32	560
S	70	42	27,5	615	55	34,5	570	65	29	660	80	32	700
A	90	57	28	800	70	35	730	80	29,5	830	93	33	840
I	110	70	28,5	985	84	35	875	96	30	910	106	33	1025
1													
E	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	50	35	27	600	47	34,5	400	70	29	500	54	32	400
S	70	47	27,5	775	62	34,5	570	84	29	690	68	32	575
A	90	60	29	935	77	35	730	100	29,5	870	86	33	735
I	110	74	28,5	1100	92	35	900	114	30	940	101	33	920
2													

Arbre 3 : Résultats des essais de flexion

Annexe 4

surface projetée du houppier
1,2,3,4 N° des directions d'essais



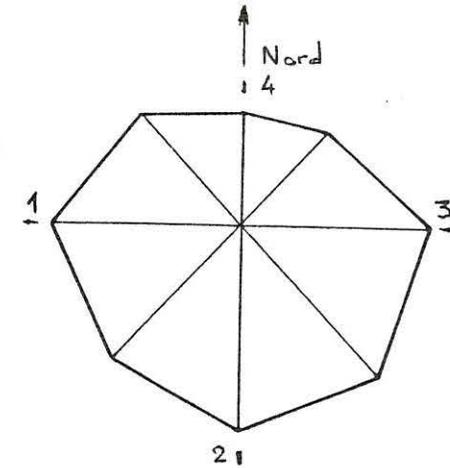
Hauteur (m)		Circonférence (m)			Masse (Kg)		$D_{1.30}^{1-3}$ (m)	$D_{1.30}^{2-4}$ (m)
totale	1ère grosse branche	base	1,30m	mi-hauteur	totale	au-dessus de L		
22,50	14,0	0,98	0,92	0,63	525	201	0,258	0,250

	F(daN)	Direction 1			Direction 2			Direction 3			Direction 4		
		$l(10^{-2}m)$	$\phi(^{\circ})$	$\epsilon_L(10^{-6})$									
E	30	19,5	13	165	15	16	230	19	18	160	19	20	100
S	50	32	14	365	25	17	390	32	19	320	32	21	340
S	70	48	15	635	35	18	530	47	20	540	47	22	540
A	90	59	16	815	44	19	680	58	21	700	60	23	740
I	110	70	16,5	1015	54	20	790	70	22	860	71	24	960
I													
E	30	17	13	175	15	16	240	18	18	180	16	20	80
S	50	30	14	395	25	17	380	31	19	340	28	21	300
S	70	42	15	605	37	18	530	45	20	540	40	22	500
A	90	54	16	855	45	19	650	57	21	710	50	23	680
I	110	65	16,5	1040	55	20	810	67	22	870	61	24	860
2													

Arbre 4 : Résultats des essais de flexion

Annexe 4

surface projetée du houppier
1,2,3,4 N° des directions d'essais



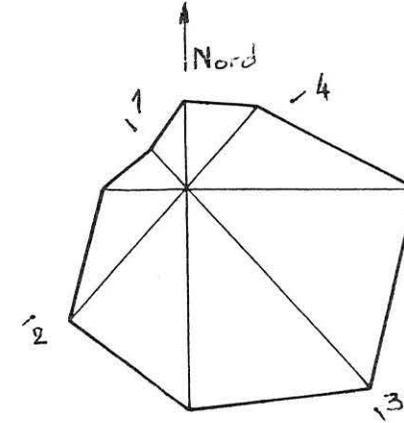
Hauteur (m)		Circonférence (m)			Masse (Kg)		$D_{1.30}^{1-3}$ (m)	$D_{1.30}^{2-4}$ (m)
totale	1ère grosse branche	base	1,30m	mi-hauteur	totale	au-dessus de L		
23,0	14,0	0,88	0,75	0,51	435	170	0,232	0,224

	F(daN)	Direction 1			Direction 2			Direction 3			Direction 4		
		l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)
E	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	50	54	24	645	60	20	700	42	20	570	51	19	700
S	70	69	24	940	76	21	950	54	20,5	840	67	20	1060
A	90	84	24,5	1230	92	22	1210	71	21	1100	86	20	1100
I	110	100	24,5	1480	111	22	1470	89	21	1330	114	21	1350
1													
E	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	50	45	24	805	44	20	720	34	20	630	42	19	600
S	70	62	24	1080	56	21	1000	45	20,5	910	55	20	840
A	90	76	24,5	1350	68	22	1270	59	21	1170	72	20	1310
I	110	93	24,5	1640	82	22	1560	73	21	1410	91	21	1560
2													

Arbre 5 : Résultats des essais de flexion

Annexe 4

surface projetée du houppier
1,2,3,4 N° des directions d'essais



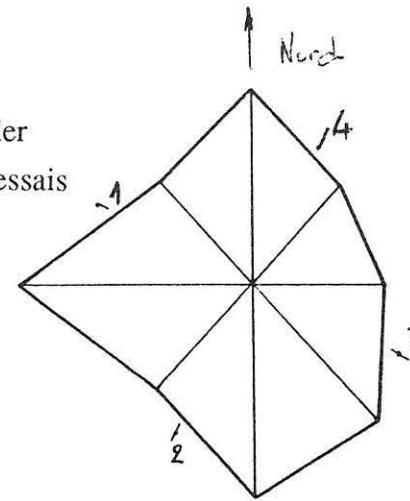
Hauteur (m)		Circonférence (m)			Masse (Kg)		$D_{1,30}^{1-3}$ (m)	$D_{1,30}^{2-4}$ (m)
totale	1ère grosse branche	base	1,30m	mi-hauteur	totale	au-dessus de L		
23,5	11,5	0,78	0,74	0,5	433	173	0,200	0,228

	F(daN)	Direction 1			Direction 2			Direction 3			Direction 4		
		l(10 ⁻² m)	α (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)
E	30	36	22	440	29	20	405	31	19	505	30	21	360
S	50	61	22	780	50	20,5	630	53	19,5	855	52	22	640
S	70	88	22,5	1120	75	21	945	76	20	1215	68	22,5	940
A	90	111	23	1425	91	22	1135	95	20,5	1515	90	23	1220
I	110	136	23	1705	109	22,5	1400	115	21	1800	111	23,5	1540
I													
E	30	35	22	460	32	20	395	30	19	485	28	21	440
S	50	58	22	800	56	20,5	620	51	19,5	845	49	22	728
S	70	82	22,5	1140	85	21	975	72	20	1175	70	22,5	1000
A	90	104	23	1445	99	22	1165	94	20,5	1425	91	23	1280
I	110	124	23	1725	122	22,5	1420	110	21	1670	104	23,5	1592
2													

Arbre 6 : Résultats des essais de flexion

Annexe 4

surface projetée du houppier
1,2,3,4 N° des directions d'essais



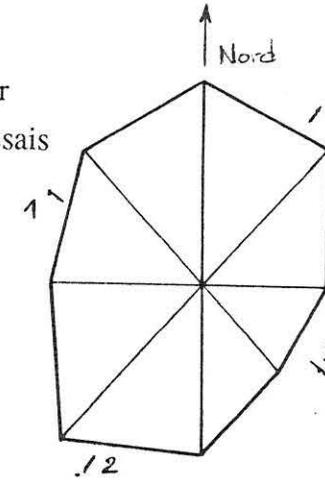
Hauteur (m)		Circonférence (m)			Masse (Kg)		D _{1.30} ¹⁻³ (m)	D _{1.30} ²⁻⁴ (m)
totale	1ère grosse branche	base	1,30m	mi-hauteur	totale	au-dessus de L		
23,5	10,5	0,96	0,82	0,55	572	233	0,244	0,234

	F(daN)	Direction 1			Direction 2			Direction 3			Direction 4		
		l(10 ⁻² m)	φ(°)	ε _L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	φ(°)	ε _L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	φ(°)	ε _L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	φ(°)	ε _L (10 ⁻⁶)
E	30	23	23,5	300	/			26	21,5	240	23	22	210
S	50	39	24	520				44	22	472	39	23	410
S	70	55	24,5	740				63	22,5	720	53	23,5	610
A	90	68	25	940				81	23	980	66	24	770
I	110	86	25,5	1160				96	23	1140	84	24,5	1010
1													
E	30	20	23,5	290				24	21,5	260	22	22	200
S	50	34	24	510				40	22	460	37	23	420
S	70	49	24,5	700				55	22,5	680	53	23,5	640
A	90	60	25	900				71	23	940	69	24	780
I	110	73	25,5	1100				88	23	1140	80	24,5	985
2													

Arbre 7 : Résultats des essais de flexion

Annexe 4

surface projetée du houppier
1,2,3,4 N° des directions d'essais



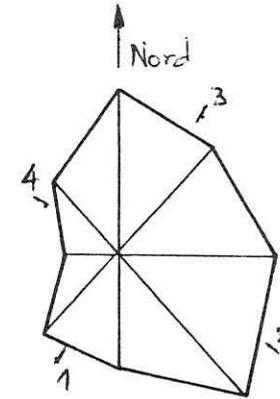
Hauteur (m)		Circonférence (m)			Masse (Kg)		$D_{1,30}^{1-3}$ (m)	$D_{1,30}^{2-4}$ (m)
totale	1ère grosse branche	base	1,30m	mi-hauteur	totale	au-dessus de L		
26.0	15.0	1,04	0,90	0,62	686	190	0,254	0,268

	F(daN)	Direction 1			Direction 2			Direction 3			Direction 4		
		l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)
E	30	17	21	215	14	23,5	270	16	26	250	15	23,5	190
S	50	29	22	400	24	24	480	28	26	380	26	24	340
S	70	42	22,5	580	33	25	670	38	26,5	500	40	25	500
A	90	52	23	760	42	26	830	49	27	660	49	26	680
I	110	63	24	940	52	26	990	59	27	840	58	26	780
1													
E	30	18	21	235	15	23,5	230	16	26	220	16	23,5	150
S	50	31	22	400	26	24	300	27	26	400	28	24	320
S	70	45	22,5	560	40	25	520	38	26,5	520	42	25	460
A	90	56	23	760	48	26	680	48	27	680	51	26	620
I	110	69	24	960	57	26	780	58	27	860	61	26	720
2													

Arbre 8 : Résultats des essais de flexion

Annexe 4

surface projetée du houppier
1,2,3,4 N° des directions d'essais



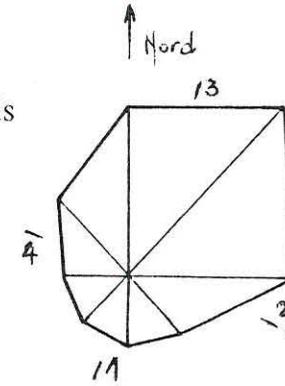
Hauteur (m)		Circonférence (m)			Masse (Kg)		$D_{1.30}^{1-3}$ (m)	$D_{1.30}^{2-4}$ (m)
totale	1ère grosse branche	base	1,30m	mi-hauteur	totale	au-dessus de L		
24,0	14,5	0,84	0,73	0,50	417	162	0,216	2.226

	F(daN)	Direction 1			Direction 2			Direction 3			Direction 4		
		l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	ϵ_L (10 ⁻⁶)
E	30	33	20	280	30	21	260	29	19	280	27	16,5	250
S	50	57	20,5	540	52	22	520	49	20	540	46	17	480
S	70	77	21	740	73	23	745	65	21	740	67	18	780
A	90	99	21,5	980	92	24	925	88	21,5	1040	84	19	980
I	110	123	22	1220	112	24,5	1165	105	21,5	1280	102	20	1240
1													
E	30	34	20	300	30	21	280	30	19	280	24	16,5	280
S	50	58	20,5	540	52	22	540	50	20	500	42	17	560
S	70	78	21	780	71	23	745	73	21	740	61	18	820
A	90	100	21,5	1020	92	24	945	90	21,5	1000	76	19	1020
I	110	125	22	1260	111	24,5	1165	110	21,5	1240	90	20	1240
2													

Arbre 9 : Résultats des essais de flexion

Annexe 4

surface projetée du houppier
1,2,3,4 N° des directions d'essais



Hauteur (m)		Circonférence (m)			Masse (Kg)		$D_{1.30}^{1-3}$ (m)	$D_{1.30}^{2-4}$ (m)
totale	lère grosse branche	base	1,30m	mi-hauteur	totale	au-dessus de L		
23,0	12,0	0,99	0,76	0,56	444	176	0,226	0,228

	F(daN)	Direction 1			Direction 2			Direction 3			Direction 4		
		l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	$\epsilon_L(10^{-6})$	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	$\epsilon_L(10^{-6})$	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	$\epsilon_L(10^{-6})$	l(10 ⁻² m)	ϕ (°)	$\epsilon_L(10^{-6})$
E	30	23	19,5	260	24	20	290	24	22	340	21	20,5	280
S	50	40	20	520	40	20,5	530	32	22,5	600	37	21	560
S	70	60	20,5	760	58	21	750	56	23	820	51	21,5	830
A	90	74	21	1000	67	22	1035	70	23,5	1000	65	22	1140
I	110	90	22	1200	83	22,5	1245	81	24	1200	80	23	1360
1													
E	30	24	19,5	270	19	20	310	19	22	340	21	20,5	300
S	50	41	20	500	34	20,5	560	41	22,5	620	35	21	590
S	70	57	20,5	780	49	21	770	52	23	860	50	21,5	800
A	90	72	21	980	63	22	1040	61	23,5	1010	66	22	1120
I	110	90	22	1220	78	22,5	1240	81	24	1240	77	23	1360
2													

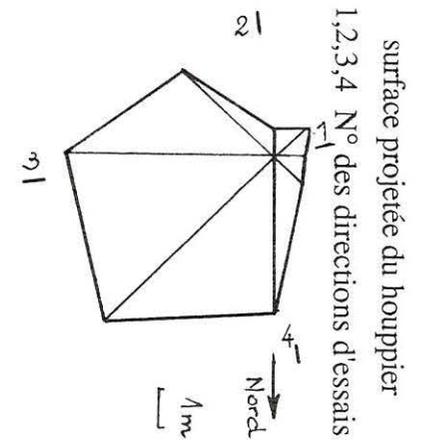
Arbre 10 : Résultats des essais de flexion

Annexe 4

charge (N)	long.cable	charge (N)	Angle(°)	Point1-EL	Point1-ET	Point1-ELT	Point2-EL	Point2-ET
0								
300	0,350		18	4	14	-45	-80	15
600	0,460		20	-5	4	-100,5	-179	34
920	0,530		20,5	-5	0	-153	-285	57
1250	0,590		20,5	-12	13	-209,5	-377	88
1520	0,610		21	-7	-10	-265,5	-454	110
800	0,500		20,5	-7	2	-134,5	-237	44
300	0,380	300	20	-9	-4	-47,5	-99	7
	0,440	500	20	-12	-9	-78,5	-155	33
	0,540	1000	21	-17	22	-172,5	-314	71
	0,640	1520	21,5	-16	2	-264	-466	100
	0,500	700	20	-16	-18	-108	-217	33
	0,390	300	19	-11	-9	-45	-99	4
Point2-ELT	Point3-EL	Point3-ET	Point3-ELT	Point4-EL	Point4-ET	Point4-ELT	Point5-EL	Point5-ET
-54,5	-9	-24	-43,5	65	-55	-42	-18	-12
-123,5	5	-49	-111	151	-122	-88	-49	-9
-190	-27	-69	-161	245	-185	-143	-69	4
-249	-35	-79	-214	328	-241	-186,5	-96	2
-310	-33	-87	-265	412	-289	-233,5	-112	-3
-147,5	-39	-76	-133,5	177	-165	-119	-95	-59
-49	-44	-74	-49	25	-92	-45,5	-84	-100
-95	-40	-68	-94	86	-128	-77	-102	-87
-208,5	-49	-107		243	-219		-112	-84
-307	-58	-161	-235	388	-304	-230	-158	-59
-123	-58	-83	-113,5	126	-167	-100,5	-128	-109
-34,5	-52	-119	-21,5	6	-103	-41,5	-125	-136

Point5-ELT	Point6-EL	Point6-ET	Point6-ELT	Point7-EL	Point7-ET	Point7-ELT	Point8-EL	Point8-ET	Point8-ELT
-17	-85	17	-9	-11	-13	-11	78	-41	-3,5
-27,5	-189	44	-22,5	-27	-16	-36,5	180	-101	-17,5
-59,5	-304	63	-34,5	-36	-27	-47,5	294	-131	-38,5
-79,5	-399	80	-44,5	-41	-30	-63,5	398	-149	-61,5
-117,5	-491	117	-60	-45	-33	-99	501	-177	-119
-58	-266	22	-39	-37	-43	-38	219	-102	-44,5
6	-126	-33	-10,5	-35	-53	-11	34	-70	-23
-27,5	-191	-19	-23,5	-37	-45	-22	113	-80	-18,5
-60	-352	51	-40,5	-40	-70	-43	295	-196	-25,5
-111,5	-520	86	-60	-51	-65	-66	476	-239	-61,5
-45,5	-264	-1	-36,5	-42	-36	-39	165	-133	-27
-9,5	-144	-68	-16	-39	-67	-18	13	-122	20,5

hauteur (m)		circonférence (m)			masse (kg)		1 - 3 D 1.30	2 - 4 D 1.30
Totale	lère grosse branche	Base	1,30	mi hauteur	Totale	> L	0,147	0,146
28,10	10,30	1,20	1,09	0,68	950	425	0,148	0,147



charge (N)	long.cable (m)	Charge (N)	Angle(°)	Point1-EL	Point1-ET	Point1-ELT	Point2-EL	Point2-ET
0	0							
300	0,32		22,5	75	-31	-33	-16	-1
620	0,43		23	211	-85	-118	-48	-12
900	0,50		23	299	-140	-184,5	-23	-7
1150	0,55		24	374	-174	-192	21	-12
1500	0,61		24	471	-256	-299,5	-92	4
	0,39	300	23	61	-89	-46	0	18
	0,48	620	24	164	-112	-132	42	24
	0,54	920	24	237	-196	-193,5	35	6
	0,60	1200	24	316	-246	-227	70	43
	0,66	1500	24	394			64	29
	0,55	900	24	207	-169	-180	40	24
	0,41	300	23	31	-84	-48,5	19	7

Point2-ELT	Point3-EL brut	Point3-ET	Point3-ELT	Point4-E L	Point4-ET	Point4-ELT	Point5-EL	Point5-ET
2,5	-101	16	37,5	-17	8	20,5	80	-26
-67	-260	40	-71	-11	41	-24	184	-91
-112	-420	43	95,5	-58	65	-7,5	83	-299
-103,5	-511	45	144	-125	57	27	118	-367
-166	-669	61	133	-75	30	-27,5	202	-428
				44	68	-14	154	4
7	-142	49		54	82	-25	276	-20
-65	-197	208		40	106	-27	398	-55
-42,5	-234	272		53	149	-47	503	-83
-52,5	-251	378		14	146	-51	591	-177
-71,5		397		37	105	-37	360	-85
-35		273		67	79	-25	132	19
12		166						

Arbre n° 11 / essai de flexion suivant direction 3

annexe 5

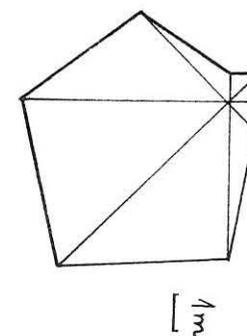
Point5-ELT	Point6-EL	Point6-ET	Point6-ELT	Point7-EL	Point7-ET	Point7-ELT	Point8-EL	Point8-ET	Point8-ELT
2	-8	37	11,5	-56	51	14,5	-27	-5	-11
-28,5	-5	33	28	-180	97	30,5	-97	-65	-6
-24	-6	44	23	-273	150	35,5	-164	-105	30,5
-33,5	-4	24	51	-342	165	65,5	-280	-101	39,5
-55	-2	40	12	-493	195	65	-217	-169	12
-28	49	90	25,5	-98	61	15,5	92	128	3
-26	106	116	-9	-199	108	-33,5	71	104	-51,5
-24,5	118	97	5,5	-312	121	41,5	51	83	22
-46	143	123	-10	-351	182	42,5	63	146	13,5
-60	121	101	-13	-467	182	45,5	22	121	14,5
-49,5	88	92	-2	-272	114	30	60	101	17,5
-27,5	55	99	11	-73	49	-38	112	114	-47

Arbre n° 11 / essai de flexion suivant direction 3 (suite)

annexe S

A-28

hauteur (m)		Circonférence (m)			masse (kg)		$\frac{1-3}{D_{1,30}}$	$\frac{2-4}{D_{1,30}}$
Totale	lère grosse branche	Base	1,30	mi hauteur	Totale	> L	0,147	0,146
28,10	10,30	1,20	1,09	0,68	950	425	0,148	0,147



Annexe 5

Arbre 11 sans houppier : essai de flexion suivant la direction 3

Charge (N)	long.cable (m)	Charge (N)	Angle (°)	Point 1-EL	Point 1-ET	Point 1-ELT	Point 2-EL	Point 2-ET	Point 2-ELT	Point 3-EL	Point 3-ET	Point 3-ELT	Point 4-EL	Point 4-ET	Point 4-ELT	Point 5-EL	Point 5-ET
300	0,37		23	82	-53	-50,5	-184	-10	83	-127	-1	52	-31	2	4,5	68	-93
600	0,48		24	162	-115	-110,5	-193	-33	36	41	41		-57	7	6	189	-193
900	0,53		24		-192		-240	-88	8	-418	37	122,5	-165	9	52		-430
1200	0,58		24,5		-258		-300	-106	9	-543	29	149	-101	20	6,5	500	-943
1500	0,65		24,5	348	-326	-280	-291	-107	-22	-648	43	173,5	-104	42	-1	602	-985
650	0,50		24	94	-218	-138	-304	-116	47	-434	-137	217,5	-52	7	16,5	324,5	-866
300	0,41	300	23	-39	-240	-68,5	-302	-135	62,5	-450	-237	277,5	-23	-28	17,5	199	-812
	0,48	500	23,5	-42	-309	-219,5	-313	-125	-26	-408	-173	177,5	-27	0	-16,5	283	-837
	0,57	1020	24	-4	-530	-196	-315	-142	5,5		-161		-46	22	11	425	-952
	0,64	1500	25	62	-625	-775,5	-311	-126	-493,5	-787	-103	-203	-73	71	-477	566	-1014
	0,52	700	24	-229	-534	-158,5	-348	-123	14,5	-553	-249	242	-36	13	-7,5	298	-901
	0,41	300	23	-802	-968	-76	-818	-621	55,5	-911	-850	294,5	-501	-501	10	-298	-1339
					-860		-677	-180	253,5	-428	-430	323	-77	-95	54	2	-818

Point5-ELT	Point6-EL	Point6-ET	Point6-ELT	Point7-EL	Point7-ET	Point7-ELT	Point8-EL	Point8-ET
-9,5	-17	-17	8	-77	20	13,5	-40	-20
-72	-12	-22	-1	-183	36	22,5	-77	-48
-140,5	-84	-39	25,5	-340	52	62	-191	-104
-444,5	-38	-47	-2,5	-415	64	53,5	-186	-115
-447,5	-24	-52	-10	-448	127	48,5	-204	-126
-431	-41	-53	-13	-236	60	26	-145	-139
-432,5	-59	-60	-286,5	-117	42	17,5	-121	-132
-460	-49	-63	-20	-159	84	6,5	-136	-139
-439,5	-47	-75	-471	-343	131	37	-188	-180
-499	-44	-75	-37,5	-473	233	29	-234	-177
-434,5	-79	-103	-15	-241	134	14,5	-184	-177
-445,5	-563	-583	-9	-585	-405	10	-634	-697
-385	-174	-129	-61,5	-95	49	0	-191	-194

Point8-ELT

16
17,5
63,5
43,5
49
46
-6,5
-402,5
39
49,5
18,5
32,5
54,5

Arbre 11 sans houppier : essai de flexion suivant la direction 3

Annexe 5

Charge (N)	long.cable	Charge (N)	Angle (°)	Point1-EL	Point1-ET	Point1-ELT	Point2-EL	Point2-ET
				12	-65	19,500	14	3
300	0,21		18	17	-73	28,000	-287	237
520	0,41		18.5	14	-80	26,000	-529	421
720	0,53		18.5	17	-72	16,500	-714	576
900	0,65		19	35	-71	8,000	-886	702
1100	0,77		19.5	54	-71	-5,500	-1070	835
700	0,57		19	49	-62	0,500		578
500	0,45		18.5	42	-63	0,500	-531	430
	0,29	300	17.5	60	-80	11,000	-300	255
	0,43	500	18.5	66	-79	9,500	-493	396
	0,56	720	19.5	82	-77	3,500	-702	570
	0,66	900	19	83	-62	-4,500	-857	688
	0,79	1100	19.5	97	-63	-21,000	-1065	836
	0,58	700	19	90	-39	-15,500	-697	562
	0,28	300	17.5	86	-49	11,500	-236	241

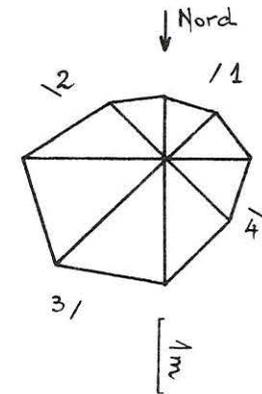
Point2-ELT	Point3-EL	Point3-ET	Point3-ELT	Point4-EL	Point4-ET	Point4-ELT	Point5-EL	Point5-ET
30,500	9	-74	31,500	18	112	-58,000	5	3
252,000	45	-117	61,000	437	111	-89,000	-29	24
428,500	69	-149	85,000	848	94	-155,000	-59	39
560,000	84	-180	99,000	1203	97	-235,000	-77	63
682,500	87	-204	108,500	1533	96	-312,500	-88	77
807,500	94	-218	115,000	1873	106	-383,500	-94	86
	83	-198	88,500	1546	144	-408,000	-57	77
426,000	91	-186	70,500	1373	163	-431,000	-48	70
284,000	68	-162	57,000	1143	180	-426,500	-8	47
416,000	83	-193	72,000	1352	169	-419,500	-23	57
574,500	90	-217	92,500	1591	160	-429,500	-34	81
674,500	107	-230	102,500	1769	160	-431,500	-56	92
810,000	117	-253	109,000	2005	146	-447,500	-75	102
544,000	109	-223	88,000	1640	198	-452,000	-39	88
251,500	97	-186	44,500	1220	250	-468,000	18	73

Arbre n° 12 / essai de flexion suivant direction 2

annexe 5

Point5-ELT	Point6-EL	Point6-ET	Point6-ELT	Point7-EL	Point7-ET	Point7-ELT	Point8-EL	Point8-ET	Point8-ELT
-3,000	-14	-23	4,500	50	9	-20,500	64	-3	-28,500
9,500	-266	70	81,000	133	-8	-8,500	366	-59	-43,500
18,000	-468	130	135,000	178	-54	7,000	592	-132	-51,000
20,000	-632	172	168,000	239	-49	-12,000	777	-167	-65,000
21,500	-782	204	202,000	285	-47	-26,000		-189	
14,000	-958	222	244,000	328	-46	-33,000	1135	-223	-101,000
9,000	-715	55	161,000	279	-12	-27,500	823	-129	-86,000
7,000	-606	-44	113,000	265	-2	-33,500	644	-75	-78,500
1,500	-472	-173	61,500	211	16	-3,500	433	-29	-55,000
5,000	-839	-318	120,500	255	0	-21,500	631	-69	-64,000
11,500	-1064	-294	171,000	309	21	-22,000	843	-104	-84,500
6,000	-1226	-288	203,000	359	7	-40,000	994	-150	-94,000
-3,500	-1424	-248	254,000	392	-8	-59,000	1181	-201	-120,000
-3,500	-1136	-378	179,000	334	13	-44,500	856	-86	-90,000
-1,500	-762	-514	70,000	292	81	-27,500	484	54	-65,000

hauteur (m)		circonférence (m)			masse (kg)		D ¹⁻³ _{1.30}	D ²⁻⁴ _{1.30}
totale	lère grosse branche	base	1,30	mi hauteur	totale	> L	0,095	0,098
23,25	10,50	0,85	0,70	0,46	453	195	0,096	0,098



surface projetée du houppier
1,2,3,4 N° des directions d'essais

Charge (N)	long.cable (m)	Charge (N)	Angle (°)	Point1-EL	Point1-ET	Point1-ELT	Point2-EL	Point2-ET
300	0,40		17,5	197	-133	11	84	-95
500	0,63		17	373	-242	41,5	168	-164
700	0,82		18,5	579	-353	73	273	-241
900	0,95		18,5	762	-449	102,5	383	-302
1100	1,08		18,5	959	-528	128,5	489	-345
680	0,83		18	577	-341	63	292	-219
300	0,47		17,5	215	-141	16	118	-91
	0,69	500	17,5	419	-232	30,5	218	-142
	0,84	700	18	599	-315	66	327	-192
	0,97	900	18,5	785	-415	84	417	-252
	1,09	1100	18,5	956	-526	115	502	-312
	0,86	700	18	607	-345	62	344	-260
	0,49	300	17	219	-137	-1	143	-84
				-78	13	-51	-31	13
Point2-ELT	Point3-EL	Point3-ET	Point3-ELT	Point4-EL	Point4-ET	Point4-ELT	Point5-EL	Point5-ET
1,5	-228	40	20	-77	-37	40	194	-109
2	-419	89	32	-141	-60	75,5	370	-195
2	-631	157	55	-211	-80	119,5	585	-268
14,5	-827	197	74	-337	-90	199,5	786	-331
10	-1015	252	100	-413	-90	248,5	986	-379
8,5	-611	144	64	-245	-90	149,5	601	-248
6,5	-219	47	22	-123	-115	67	228	-114
0	-421	113	38	-214	-123	105,5	437	-166
0,5	-611	175	56	-297	-124	156	627	-224
	-790	221	200	-376	-150	519	811	-292
21	-962	272	95	-457	-183	254	987	-377
27	-609	-230	271	-340	183	-16,5	640	-221
-4,5	-198	81	17,5	-153	-162	61	235	-122
2	121	-6	1,5	112	-175	-77	-93	-25

Annexe 5

Arbre 12 sans houppier : essai de flexion suivant la direction 3

Charge (N)	long.cable (m)	Angle (°)	Point1-EL	Point1-ET	Point1-ELT	Point2-EL	Point2-ET	Point2-ELT
300	0,37	18	230	-105	0,5	141	-29	-21
500	0,59	18	368	-183	15	207	-66	-18,5
700	0,73	18	522	-279	26,5	266	-128	-11
900	0,85	18	667	-362	67,5	345	-167	-6
1100	0,97	18	833	-437	76	432	-194	13
680	0,75	18	494	-252	8	306	-75	-20
300	0,45	17,5	216	-114	62	184	13	-19
0			-35	4	-92	48	76	-11
Point3-EL	Point3-ET	Point3-ELT	Point5-EL	Point5-ET	Point5-ELT	Point6-EL	Point6-ET	Point6-ELT
-198	97	9,5	255	-114	-50	52	-71	28
-358	180	12	403	-167	-36	117	-94	21,5
-549	165	35	560	-248	-37	128	-134	52
-707	216	56	736	-274	-47	148	-178	81
-869	280	92	912	-334	-57	185	-207	100
-472	230	29	566	-194	-79	52	-134	77
-185	144	20	278	-108	-54	-16	-81	50
52	60	13	66	-10	-52	-118	-41	53
Point8-EL	Point8-ET	Point8-ELT						
-80	4	54						
-137	31	99						
-198	12	161						
-234	36	204						
-294	35	267						
-184	-12	139						
-109	-27	66						
-46	-33	-5						

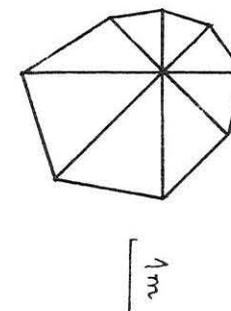
Point5-ELT	Point6-EL	Point6-ET	Point6-ELT	Point7-EL	Point7-ET	Point7-ELT	Point8-EL	Point8-ET	Point8-ELT
-13,5	-55	-89	55	-242	87	116,5	-98	-30	67
-26,5	-2	-146	64	-476	191	248,5	-178	-38	131
-36,5	59	-201	85	-715	300	390	-259	-35	199
-49	124	-245	100	-912	411	517	-318	-14	257
-62	197	-261	115	-1111	535	645	-386	20	336
-62,5	37	-188	100	-678	291	374	-239	-50	200
-47	-93	-100	78,5	-276	86	145	-115	-59	91
-71,5	-8	-145	68,5	-488	211	262	-172	-28	128
-64	43	-192	98	-686	343	376,5	-241	1	196
-142,5	104	-243	242	-884	426	240	-302	-3	460
-85	146	-293	194	-1076	542	619	-370	-16	316
-115	31	349	-125	-699	309	378	-268	-54	198
-84,5	-116	-142	137	-289	69	128	-131	-84	68,5
-69	-238	-75	129	-200	-130	83	51	-123	-63

Arbre n° 12 / essai de flexion suivant direction 3 (suite)

annexe 5

A-35

hauteur (m)		Circonférence (m)			masse (kg)		1 - 3 D 1,30	2 - 4 D 1,30
totale	lère grosse branche	base	1,30	mi hauteur	totale	> L	0,095	0,098
23,25	10,50	0,85	0,70	0,46	453	195	0,096	0,098



Annexe 6

Rigidités locales (KI) expérimentales et calculées (N.m x 10⁶)

n° arbre	direction	expérimentales		calculées	
		essai 1	essai 2	sans. P	avec P
1	1	11	11,5	19,7	17,6
1	2			19,5	17,4
1	3	10,9	10,7	17,2	14,9
1	4	11,8	11,6	14,4	14,1
2	1	10	10,4	20,4	18,3
2	2	11,5	11,5	18,6	16,6
2	3	14,1	13,4	16,9	15,1
2	4	14,5	14,7	19	17,0
3	1	10	11,7	18,4	14,7
3	2	11,5	11	16,1	14,3
3	3	10,9	10,3	15,4	13,8
3	4	12,0	10,8	14,8	13,2
4	1	8,8	8,6	12,2	11,1
4	2	13	13	11,7	10,6
4	3	10,2	10,4	11,2	10,1
4	4	8,5	9,2	11,5	10,4
5	1	6,6	6,6	11,1	9,4
5	2	7,3	6,6	9,1	7,9
5	3	7,4	7,3	8,2	7,1
5	4	6,7	7,6	8,2	7,1
6	1	5,9	5,9	6,9	5,6
6	2	7,5	7,2	8,2	7,1
6	3	5,9		6,1	5,3
6	4	6,3	6,5	6,0	5,3
7	1	8,7	9,2	12,3	10,8
7	2			12,1	10,6
7	3	10,4	10,7	11,8	10,4
7	4	9,6	9,7	11,9	10,5
8	1	11,7	11,7	17,1	15,5
8	2	11,5	14,2	17,7	16,4
8	3	14	13,2	15,8	14,4
8	4	13,4	13,9	15,7	14,4
9	1	8,5	8,2	11,2	9,9
9	2	8,7	8,8	10,0	8,9
9	3	7,9	8,2	8,3	7,4
9	4	8	8,3	9,1	8,1
10	1	8	7,9	11,5	10,1
10	2	7,8	8	10,3	9,1
10	3	8,7	8,3	10,3	9,0
10	4	6,7	7	9,6	8,5
11	1	18,8		18,8	16,6
11	2	17,4	17,5	19,9	17,0
11	3	18,6		18,2	15,0
11	4	19	17,8	20,2	17,8
11	5	15,2		17,3	15,9
11	6	17,6	17,8	20,8	17,8
11	7	18,6		19,0	15,7
11	8	16,9	16,6	21,1	18,6
12	1	5,9	6,3	6,8	5,9
12	2	6,0	6,3	7,8	6,2
12	3	5,7	6,1	7,9	6,6
12	4	4,9	5,6	8,7	7,4
12	5	6,0	6,4	7,2	6,2
12	6	7,4	5,5	8,0	6,4
12	7	5,6	6,1	8,4	7,0
12	8	6,6	6,9	8,9	7,6

Annexe 7

Rigidités globales (K) expérimentales et calculées (N/m)

n° arbre	direction	expérimentales		calculées selon différentes hypothèses		
		essai n°1	essai n°2	cône + poids	cône	cylindre
1	1	2025	1920	1545	1830	2810
1	2			1570	1910	2900
1	3	1980	2120	1545	1830	2810
1	4	1700	2230	1570	1910	2900
2	1	2020	1830	2420	2770	3740
2	2	1600	1650	2335	2530	3460
2	3	2010	2210	2420	2770	3740
2	4	1710	1810	2335	2530	3460
3	1	1360	1530	1960	1970	3040
3	2	1360	1430	2120	2440	3440
3	3	1430	1330	1960	1970	3040
3	4	1570	1270	2120	2440	3440
4	1	1550	1680	2210	2490	3250
4	2	2010	1940	2130	2270	3100
4	3	1710	1790	2210	2490	3250
4	4	1510	1760	2130	2270	3100
5	1	1290	1250	1220	1460	2130
5	2	1180	1580	1170	1310	1970
5	3	1360	1600	1220	1460	2130
5	4	1150	1350	1170	1310	1970
6	1	810	890	730	740	1250
6	2	1190	1070	860	1090	1600
6	3	960	980	730	740	1250
6	4	1000	1025	860	1090	1600
7	1	1270	1490	1795	2090	2810
7	2			1720	1840	2680
7	3	1130	1150	1795	2095	2810
7	4	1340	1330	1720	1840	2680
8	1	1720	1570	1905	1930	2810
8	2	2110	2400	2020	2270	3170
8	3	1820	1860	1905	1930	2810
8	4	2250	2115	2020	2270	3170
9	1	900	890	1460	1540	2030
9	2	980	990	1490	1770	2270
9	3	1040	1000	1460	1540	2030
9	4	1120	1330	1490	1770	2270
10	1	1210	1250	1600	1810	2280
10	2	1370	1370	1620	1860	2370
10	3	1280	1355	1600	1810	2280
10	4	1370	1400	1620	1860	2370
11	1	4960	4540	6050	6490	8470
11	2			5960	6360	8230
11	3			6050	6490	8470
11	4	5200	5290	5960	6360	8230
12	1	1535	1680	1265	1470	1960
12	2			1305	1620	2090
12	3			1265	1470	1960
12	4	1600	1630	1305	1620	2090

Annexe 8 (début)

Modules d'élasticité (E_{LA}) sur éprouvettes et calculés à partir des rigidités
globales et locales observées (MPa)

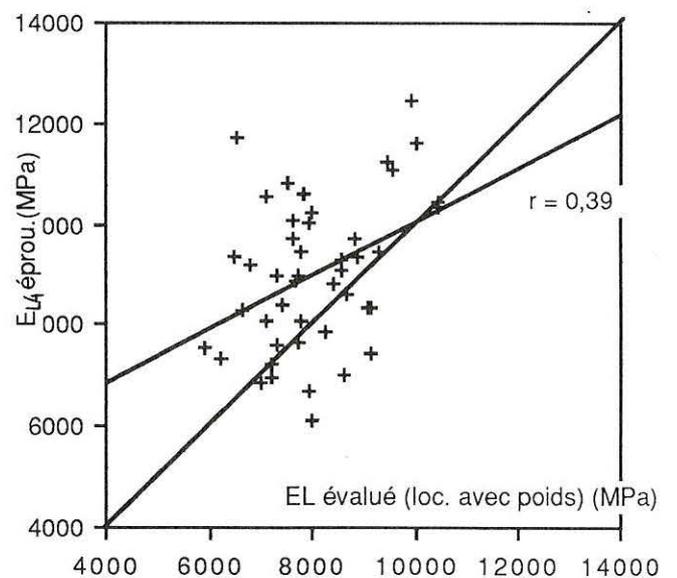
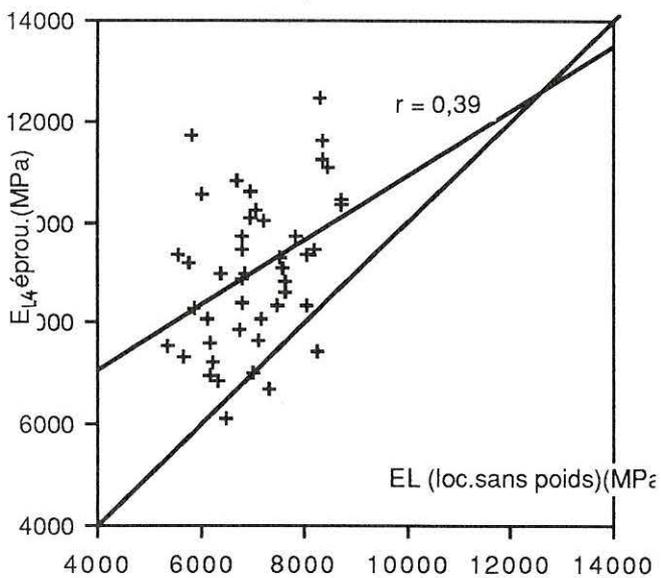
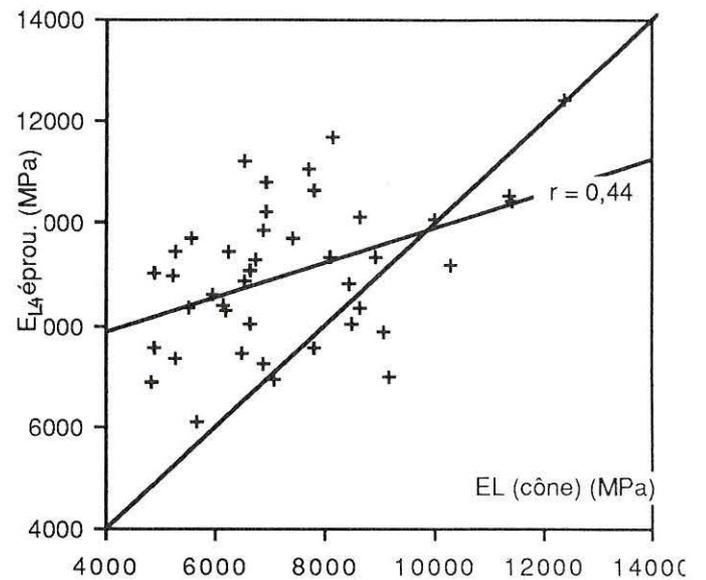
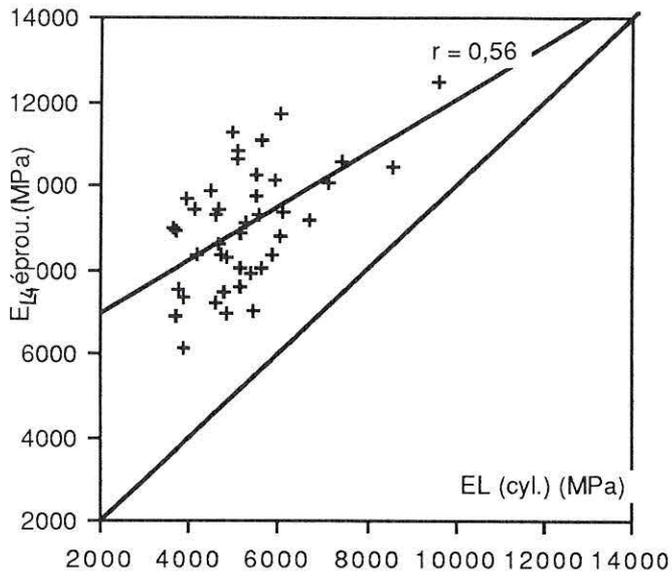
n° arbre	observées sur éprouvettes			calculés à partir de K	
	éprov. (1)	éprov.(2)	éprov.(moy)	global (cône)	global (cyl.)
1	11700	9400	10550	11370	7410
1	11500	7950	9725		
1	9300	9050	9175	10280	6690
1	7850	7300	7575	7790	5130
2	11300	12100	11700	8130	6020
2	11200	10450	10825	6950	5080
2	10200	9250	9725	7410	5480
2	10750	11400	11075	7700	5630
3	11500	9750	10625	7790	5050
3	9750	9650	9700	5540	3930
3	10100	9600	9850	6900	4470
3	8950	8950	8950	5200	3690
4	7650	7440	7545	4890	3750
4	7440	7470	7455	6490	4750
4	6900	6850	6875	4830	3700
4	7450	7250	7350	5290	3880
5	9550	9100	9325	8110	5560
5	8050	-	8050	8480	5640
5	7300	6600	6950	7050	4830
5	7400	7050	7225	6900	4585
6	7600	8150	7875	9050	5360
6	8200	8450	8325	8630	5880
6	7050	6950	7000	9170	5430
6	6400	5800	6100	5660	3860
7	9270	9580	9425	6220	4630
7	9240	9550	9395		
7	9050	8950	9000	4900	3650
7	8950	9600	9275	6730	4620
8	9650	10550	10100	8610	5910
8	10200	9900	10050	9990	7150
8	9850	8850	9350	8920	6120
8	8950	8650	8800	8460	6060
9	11400	11100	11250	6540	4960
9	9550	9300	9425	5250	4090
9	8700	7950	8325	5510	4185
9	8450	8750	8600	5950	4640
10	9800	10650	10225	6950	5520
10	9050	8700	8875	6540	5130
10	9100	9100	9100	6620	5260
10	8550	8050	8300	6180	4850
11	8200	8550	8375	6130	4700
11	7400	7950	7675		
11	6750	6600	6675		
11	8200	7900	8050	6640	5130
12	10800	10100	10450	11430	8570
12	10350	10350	10350		
12	11600		11600		
12	12450		12450	12410	9620

Annexe 8 (suite)

Modules d'élasticité (E_{L4}) sur éprouvettes et calculés à partir des rigidités globales et locales observées (MPa)

calculés à partir de KI		n° arbre
loc. (sans poids)	loc. (poids)	
6000	7100	1
		1
5760	6820	1
6170	7300	1
5830	6550	2
6680	7510	2
7860	8830	2
8480	9530	2
6970	7830	3
6780	7620	3
		3
6870	7720	3
5350	5910	4
8270	9140	4
6340	7000	4
5660	6250	4
5560	6470	5
6120	7120	5
6190	7200	5
6210	7220	5
6740	8270	6
7460	9150	6
7030	8630	6
6500	7980	6
6820	7800	7
		7
6400	7320	7
7500	8570	7
6930	7620	8
7210	7920	8
8060	8860	8
7630	8380	8
8350	9430	9
8220	9290	9
8050	9100	9
7650	8640	9
7070	7990	10
6790	7670	10
7560	8540	10
5890	6660	10
6810	7435	11
7125	7745	11
7310	7950	11
7145	7765	11
8725	10445	12
8695	10410	12
8340	9985	12
8275	9905	12

Annexe 8 (suite)

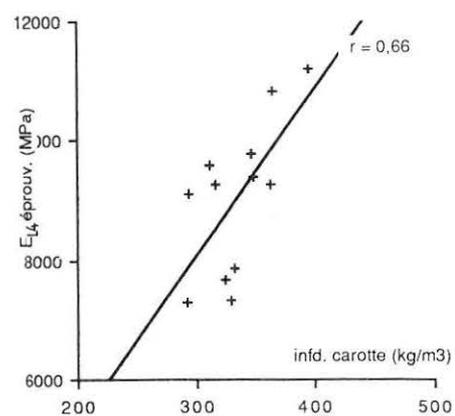
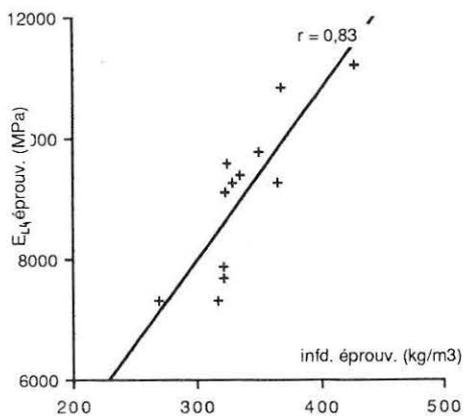
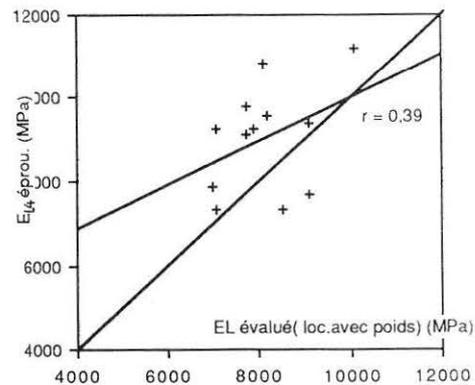
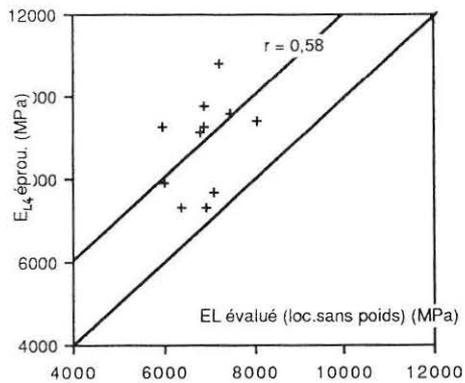
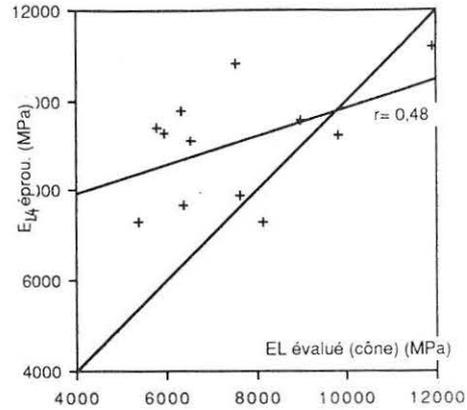
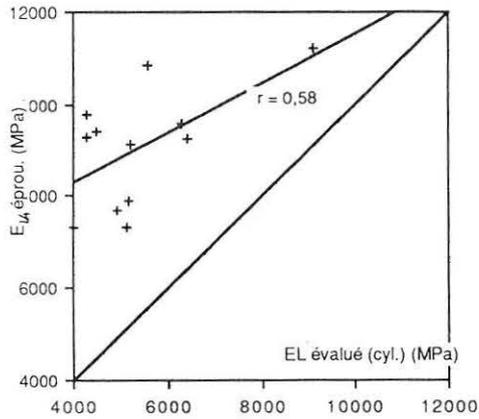


Chaque graphique représente la liaison entre le module d'élasticité calculé, selon certaines hypothèses, à partir des rigidités globales et locales observées, et le module d'élasticité (E_{L4}) obtenu sur éprouvette. Chaque arbre est généralement représenté par 4 ou 3 points.

Les coefficients de corrélation indiqués sont significatifs au seuil de 1%.

Annexe 8 (fin)

Chaque graphique représente la liaison entre le module d'élasticité calculé, selon certaines hypothèses, à partir des rigidités globales et locales observées, et le module d'élasticité (E_{L4}) obtenu sur éprouvette. Chaque arbre est représenté par 1 point moyen. Nous indiquons également deux graphiques qui mettent en évidence la liaison "infradensité- E_{L4})



n° arbre	H.T. (m)	Circ. sol (m)	Circ.1,30 (m)	circ.HT/2(m)	M > L (kg)	M.T. (kg)	incli (x10-3)	SH (m2)
1	27,0	1,11	0,93	0,67	310	820	65	35,0
2	25,5	1,05	0,90	0,64	310	735	30	35,7
3	25,0	1,02	0,85	0,59	260	660	80	28,1
4	22,5	0,98	0,92	0,63	205	525	10	26,7
5	23,0	0,88	0,75	0,51	170	435	40	25,5
6	23,5	0,78	0,74	0,50	175	435	70	25,3
7	23,5	0,96	0,82	0,55	235	575	35	23,6
8	26,0	1,04	0,90	0,62	190	690	15	24,3
9	24,0	0,84	0,73	0,50	165	420	40	15,4
10	23,0	0,99	0,76	0,56	180	445	50	14,2
11	28,1	1,20	1,01	0,68	425	950	168	35,0
12	23,2	0,85	0,70	0,44	195	455	5	6,2

H.T. : hauteur totale

Circ.sol : circonférence au niveau du sol

Circ. 1,30 : circonférence à hauteur d'homme

Circ. HT/2 : circonférence à mi-hauteur de tige

M>L : masse de la partie aérienne située au dessus de L = HT/2

M.T. : masse totale humide de la partie aérienne de l'arbre (tige+branches+ feuilles)

Incli : tangente de l'angle relevé selon la description faite en 3.2.1

S.H. : surface projetée du houppier

Annexe 10 (début)

Variation angulaire d'infradensité en périphérie d'une section droite de fût
située à hauteur d'homme

Pour chaque arbre (n°1 à 12), une rondelle est prélevée de part et d'autre de la couronne de relevés de déformation à 1,3 mètre ; pour les arbres n°11 et n°12, on découpe deux fois 2 rondelles, puisqu'il y a deux couronnes où les déformations sont relevées.

Douze secteurs appariés sont découpés sur ces rondelles ; ils sont repérés à partir de la position supposée tendue. Sur chacun d'entre eux, on découpe à la scie sauteuse, un échantillon formé des trois derniers cernes formés, sur lequel une mesure d'infradensité selon le protocole habituel est réalisée.

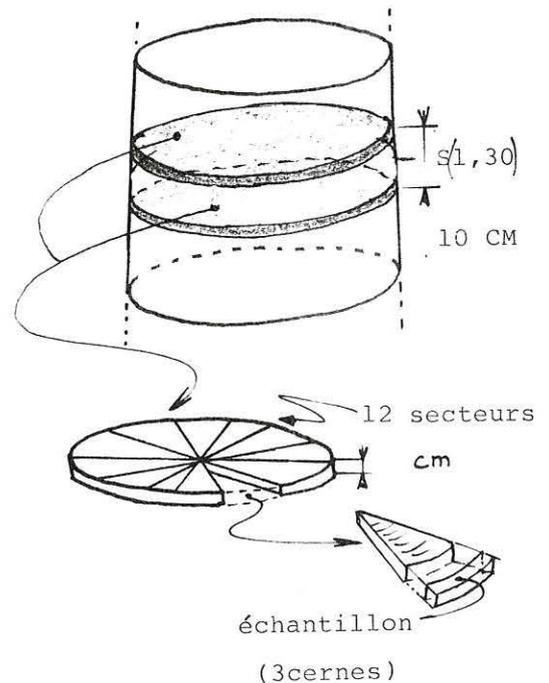
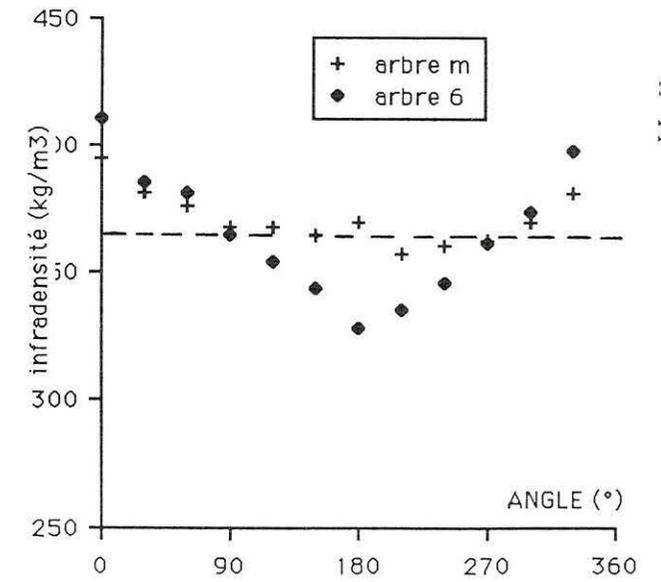
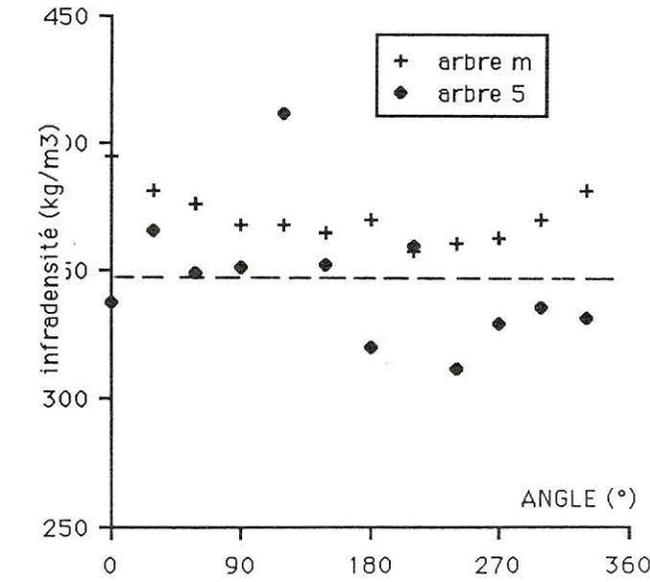
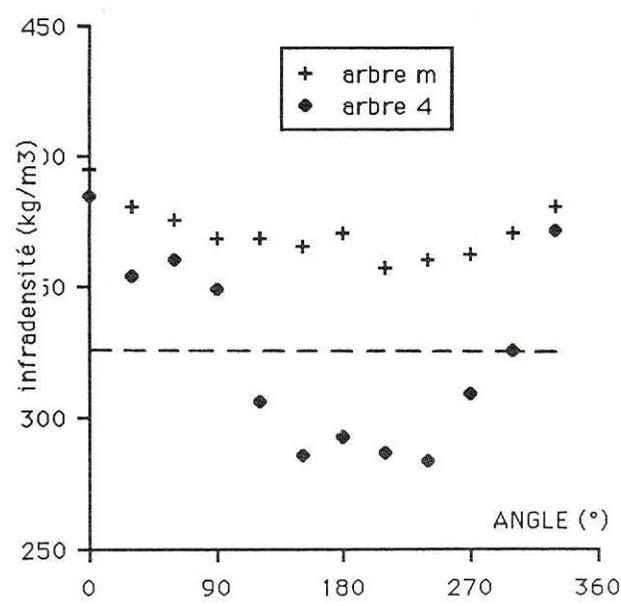
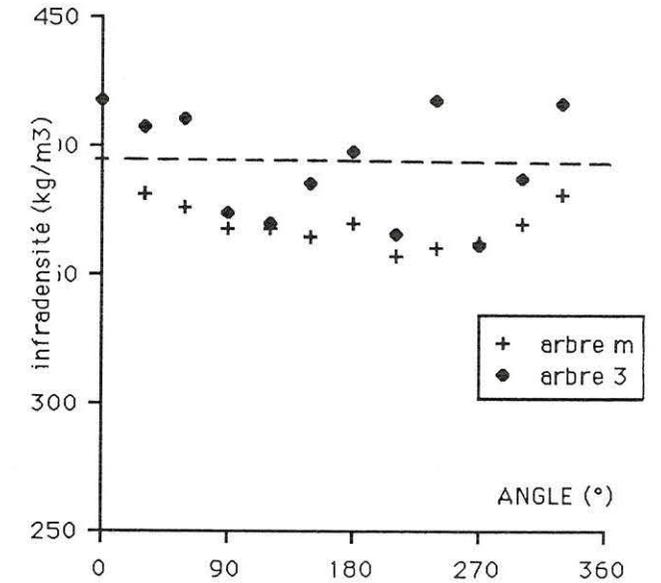
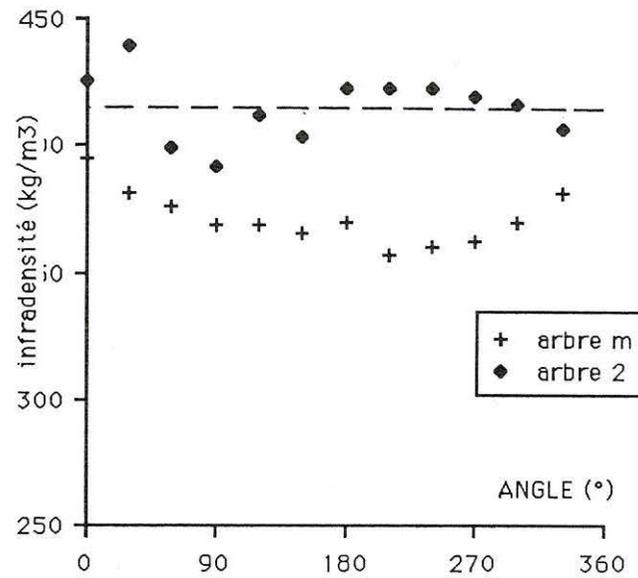
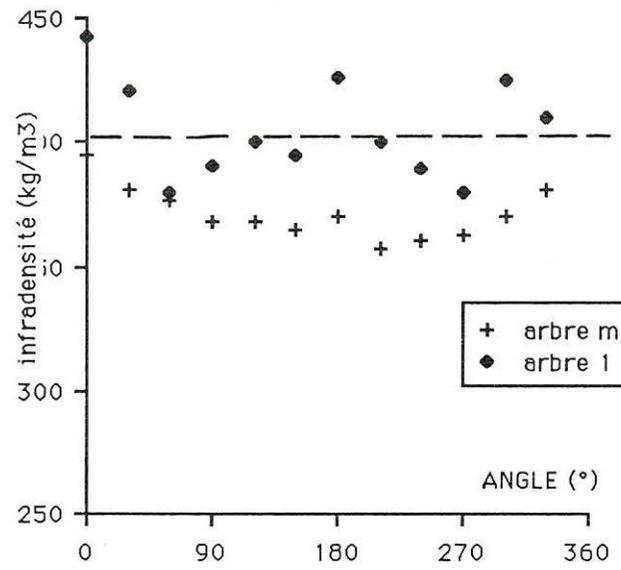


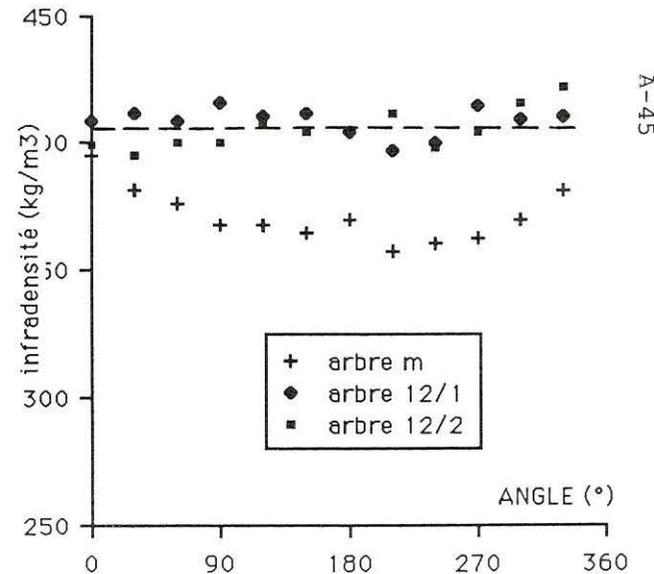
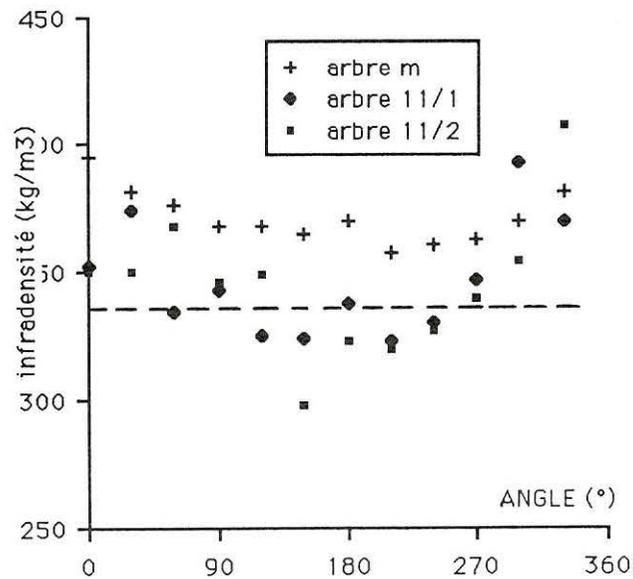
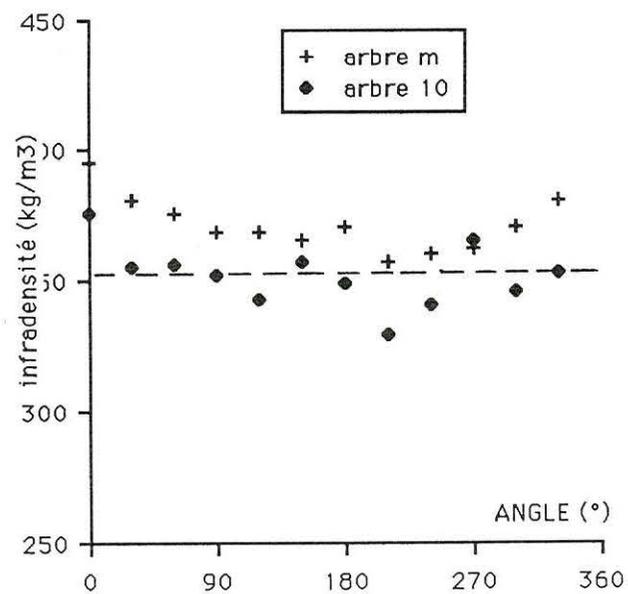
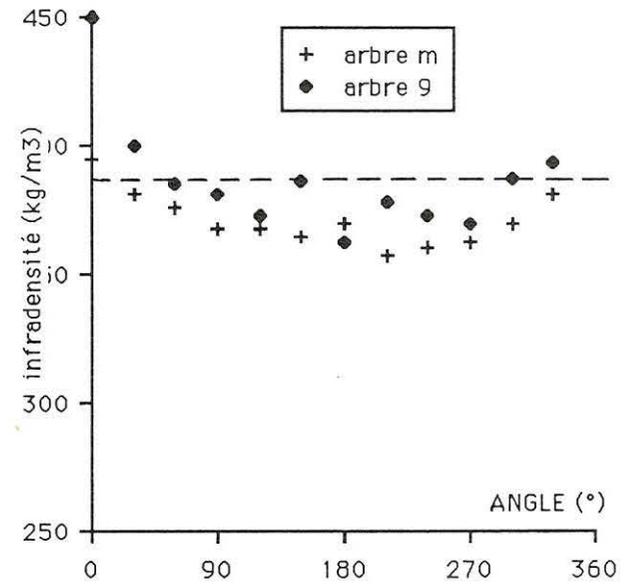
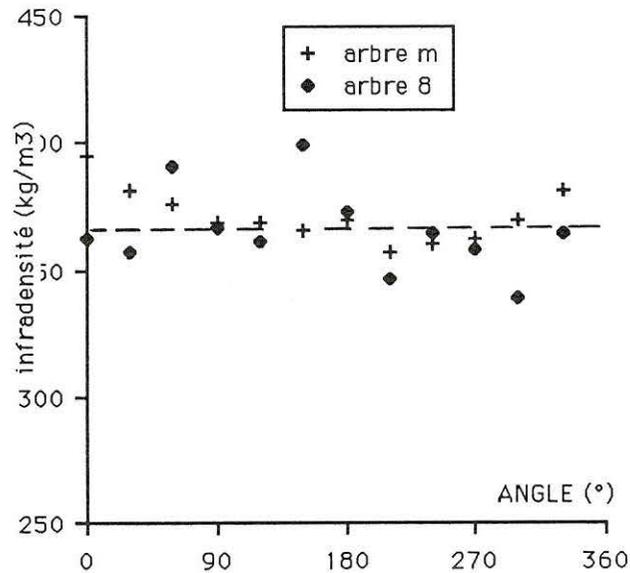
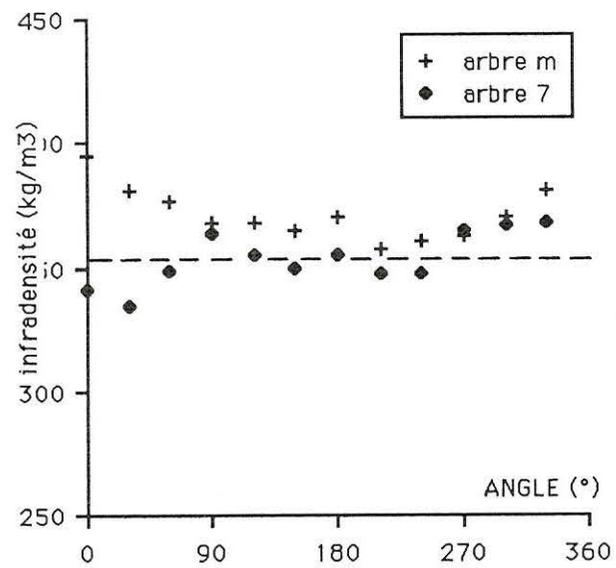
Figure 1 : Découpe d'échantillons sur rondelles

L'infradensité obtenue pour chaque morceau est moyennée avec celle trouvée sur le morceau apparié. On représente alors les variations angulaires de l'infradensité au niveau de la section (figure 1) . Sur le graphique de chaque arbre, on indique également la variation angulaire d'infradensité moyenne : chaque point représente la moyenne de toutes les infradensités observées à cette position.

Cette courbe moyenne indique que l'infradensité n'est pas uniforme, mais qu'elle passe par des valeurs extrêmes qui sont géométriquement opposées. Ceci s'explique à partir de la découpe adoptée, la position 0° correspond à la zone supposée la plus tendue du billon ; là où il a certainement du bois de réaction, on observe l'infradensité maximum alors que le minimum est situé au niveau des 180°, la zone de bois "opposé". Plusieurs arbres suivent ce schéma (n°4, n°6,...) alors que d'autres indiquent peu de variation angulaire (n°12) ou bien une distribution plus complexe.



Annexe 10 (suite) : Distribution angulaire de l'infradensité en périphérie d'une section droite
située à hauteur d'homme
(arbre m : arbre moyen, infradensité moyenne sur l'ensemble des arbres)
— — — : infradensité moyenne des valeurs d'infradensités observées sur l'arbre



Annexe 10 (fin) : Distribution angulaire de l'infradensité en périphérie d'une section droite
située à hauteur d'homme

(arbre m : arbre moyen, infradensité moyenne sur l'ensemble des arbres)

— — — : infradensité moyenne des valeurs d'infradensités observées sur l'arbre

SUMMARY

The aim is to propose a non destructive method to estimate in standing tree, the modulus of elasticity of wood in the longitudinal direction E_L

12 poplars trees were tested by bending tests in four directions ; each test allows to define a global stiffness K , and a local stiffness of the cross section K_l .

To justify the use of this values as a quality index of wood, they are compared to MOE of green samples (standard NF-B51006).

The global stiffness qualifies the whole heterogeneous structure (rooting, trunk and crown) and gives a proper classification for 6 trees.

The local stiffness characterizes the mean elastic behavior of wood in a cross section, and gives a good classing for 10 trees.

K_l measurements must be analysed by using beam theory, taking into account the elliptic shape of the cross section, as well as the additional bending moment induced by the crown weight.

Those results allows a better understanding of the standing tree response to bending forces (of low magnitude). They suggest to implement mechanical grading of standing trees (by building a testing machine), and lead futher studies on geometrical singularities and material heterogeneities as reaction wood.

Key Words : Tree, bending test, stiffness, modulus of elasticity, poplars