

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

M Fournier ¹, P Langbour ², D Guitard ^{1*}

avec la collaboration de P Michel ², J Perrin ²

¹ IUT A, Université de Bordeaux I, laboratoire de rhéologie
du bois de Bordeaux, 33405 Talence Cédex;

² INRA, centre de recherches de Nancy, station qualité des bois,
Champenux, F 54280 Seichamps, France

(Reçu le 3 avril 1990; accepté le 27 août 1990)

Résumé — Le fût d'un arbre sur pied est soumis à l'action de la pesanteur, qui induit un effet de flexion sur un arbre déséquilibré. La qualification de cette action réclame donc d'évaluer non seulement la masse de l'arbre, mais aussi son déséquilibre, c'est-à-dire la position de son centre de gravité dans un plan horizontal. Une méthode d'estimation de cette position à partir de relevés dendrométriques simples (mesure d'une inclinaison du fût, de huit rayons de la projection au sol du houppier) est proposée. Appliquée à 9 peupliers, elle permet de classer les individus en trois groupes : droits, inclinés, flexueux. Confrontée aux résultats d'un essai mécanique de suppression de la masse supportée, elle apparaît suffisante pour estimer la direction de l'effort de flexion sur les individus de conformation simple, droits ou inclinés, mais doit être affinée dans les cas plus complexes. L'essai comme la modélisation confirment en outre la prépondérance des effets de flexion sur ceux de compression, même sur des individus apparemment équilibrés.

mécanique de l'arbre / dendrométrie / fonction de soutien / *Populus*

Summary — **Mechanics of standing trees: the evaluation of gravitational forces on a tree trunk from the usual tree measurements.** A standing tree stem is submitted to gravity, eg bending forces on a non-equilibrated tree. To qualify gravitational effects, one must evaluate not only the tree mass, but also the "lever arm", and therefore the position of the centre of gravity in a horizontal plane, which cannot be measured in a felled tree. From a simple schematization of the tree (a right tilted stem, and a crown, fig 1), a method of estimating these co-ordinates from a few measurements in the standing tree is proposed, using the slope of the stem at breast height and 8 radii of the crown (to evaluate the magnitude and direction of its eccentricity, (fig 2). First, we applied the method to 9 poplars, and classified them into three groups: right and vertical trees, tilted trees, and twisted ones (table 1). We then used this method to estimate bending moments acting on the standing trees, and compared this estimate with the experimental results of a mechanical test: the felling of the supported mass (fig 3). Measurements and modelling show that the effect of bending forces is always more

* Correspondance et tirés à part

obvious than that of compressive ones, even in apparently equilibrated trees. The schematization is adequate for the first two groups: right and vertical trees and tilted ones (fig 5, trees 1–7), and the estimation of crown parameters is of greater importance than the stem slope. In order to describe twisted trees (trees 8 and 9), one must make further measurements.

mechanics of standing trees / dendrometry / support function / Populus

INTRODUCTION

Une fonction essentielle du bois dans l'arbre sur pied est de constituer la structure porteuse qui permettra à l'arbre de se soutenir et de résister aux agressions (vents, masses additionnelles de neige, de givre). L'analyse de ces efforts extérieurs et de leurs effets est un des volets étudiés par la mécanique de l'arbre sur pied, dans le but de définir les situations critiques d'instabilités (chablis, casse), de proposer des tests de qualification du bois dans l'arbre sur pied à partir de sa réponse de structure à une sollicitation artificielle (Langbour, 1989), et d'analyser les règles d'élaboration du bois qui permettent à une tige de s'adapter à son environnement en assurant sa fonction de soutien. Pour le mécanicien, les efforts extérieurs, tels que vents, poids..., se schématiseront, au niveau d'une section droite, par un "torseur", qui se traduit notamment par une flexion. L'analyse de ce torseur requiert donc de connaître le moment fléchissant sur la section droite, c'est-à-dire l'intensité de l'effort résultant et la position de son point d'application. Cette position dépend de la morphologie de l'individu, étudiée par les forestiers dendrométriciens, et les botanistes architectes de l'arbre. Notre objectif est ici de proposer, à partir de relevés dendrométriques classiques, une schématisation de la tige sur pied et de son houppier, qui permette d'estimer la position de son centre de gravité, donc le moment fléchissant induit à la base par le poids propre supporté. Cette schématisation sera confrontée aux valeurs des déformations

mesurées à la surface du tronc lors du tronçonnage de la tige.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Une schématisation de l'arbre, à partir de quelques relevés géométriques

L'arbre est schématisé par un fût rectiligne incliné qui supporte un houppier (fig 1) et est donc caractérisé par (les vecteurs figurés en gras) :

– l'inclinaison α (angle positif, inférieur à 90°) du fût par rapport à la vertical **V**, et

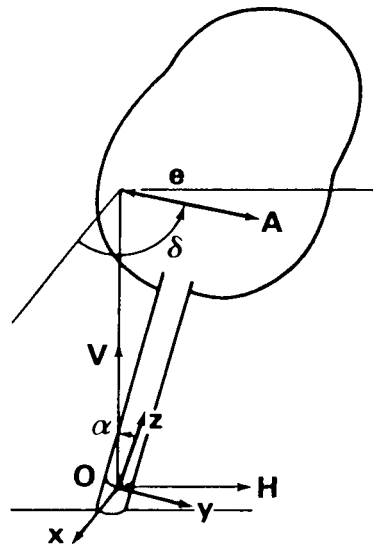


Fig 1. Schématisation géométrique de l'arbre et définition des référentiels adaptée pour l'estimation des efforts gravitationnels supportés par le tronc.

l'azimut de cette inclinaison, c'est-à-dire la direction H vers laquelle l'arbre penche.

Ces grandeurs permettent de définir à partir d'une origine que l'on choisit au centre de la section droite située à hauteur de poitrine (1,3 m) le référentiel terrestre (O, x, H, V) et le référentiel du fût (O, x, y, z) . α est l'angle de la rotation autour de Ox qui amène (O, x, y, z) sur (O, x, H, V) .

– les coordonnées polaires de la projection du centre de gravité du houppier dans le plan (O, x, H) : l'excentricité de la cime e et sa direction δ .

Nous nous proposons de qualifier ces grandeurs, H , α , e et δ par des mesures dendrométriques relativement simples et conventionnelles :

– la direction H et l'inclinaison α sont évaluées à l'aide d'un fil à plomb de longueur L (on choisira ici $L = 1$ m) monté à l'extrémité d'une canne appuyée sur l'arbre à une hauteur de 2,3 m. Une règle graduée joignant le bas du fil à plomb à l'arbre tangentiellement au tronc permet la mesure de la distance horizontale D (fig 2). Cette mesure étant répétée (sur la face in-

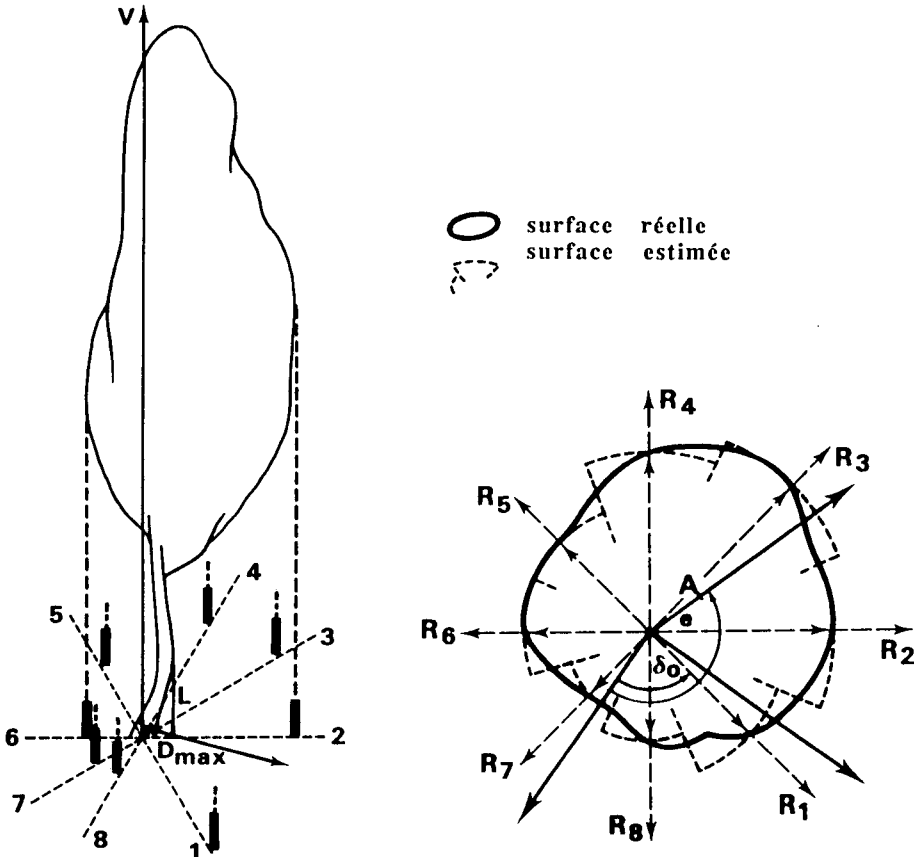


Fig 2. Relevés dendrométriques effectués sur les 9 arbres de l'étude : inclinaison à hauteur de poitrine et projection au sol du houppier.

férieure où elle est possible) en appuyant la canne successivement en plusieurs points de la circonférence; **H** est la direction mesurée à la boussole, où *D* est maximum ($D = D_{max}$), $tg\alpha$ est alors égale à D_{max}/L (Langbour, 1989). La décroissance du diamètre entre le bas et le haut du fil à plomb est négligée.

- *e* et δ sont estimées par la surface projetée au sol du houppier. La dendrométrie classique conseille une approximation de l'aire de cette surface par celle représentée sur la figure 2, définie à partir de la mesure de 8 rayons R_i dans 8 directions $i = 1, 2, \dots, 8$ à 45° , à partir du pied de l'arbre O' (Pardé et Bouchon, 1988). Nous utiliserons ces mêmes mesures en admettant qu'une bonne estimation de *e* et δ est donnée par la position du point A, centre géométrique de la précédente surface, tel que :

$$O'A = \frac{2 \sum_{i=1}^8 R_i^3}{3 \sum_{i=1}^8 R_i^2}$$

Le calcul des coordonnées polaires *e'*, δ' de A dans ($O', \mathbf{x}, \mathbf{H}, \mathbf{V}$) conduit alors à :

$$e'^2 = \frac{\sum_{i=1}^8 R_i^6 - 2 \sum_{i=1}^4 R_i^3 R_{i+4}^3 + \sqrt{2} \sum_{i=1}^7 R_i^3 R_{i+1}^3 - \sqrt{2} \sum_{i=1}^5 R_i^3 R_{i+3}^3 - \sqrt{2} \sum_{i=1}^3 R_i^3 R_{i+5}^3 + \sqrt{2} R_1^3 R_8^3}{9 \left[\sum_{i=1}^8 R_i^2 \right]^2}$$

et

$$tg(\delta' - \delta_0) = \frac{\frac{\sqrt{2}}{2} R_2^3 + R_3^3 + \frac{\sqrt{2}}{2} R_4^3 - \frac{\sqrt{2}}{2} R_6^3 - R_7^3 - \frac{\sqrt{2}}{2} R_8^3}{R_1^3 + \frac{\sqrt{2}}{2} R_2^3 - \frac{\sqrt{2}}{2} R_4^3 - R_5^3 - \frac{\sqrt{2}}{2} R_6^3 + \frac{\sqrt{2}}{2} R_8^3}$$

si δ_0 est l'angle qui amène **x** sur 1.

En assimilant la projection horizontale du point O' (au pied de l'arbre) à celle de O (à 1,3 m), *e'* et δ' sont directement les grandeurs *e* et δ recherchées.

Torseur des efforts induit par un poids sur le fût

L'arbre supporte une distribution de masse qui transmet un effort au niveau de la section droite médiane d'un billon cylindrique élémentaire proche de l'empattement. L'action d'un poids $\mathbf{P} = -\mathbf{PV}$, se schématise au niveau de la section droite, avec les concepts généraux de la théorie des poutres par un torseur (Laroze, 1980). Nous n'analyserons ici que l'effet des moments de flexion \mathbf{M}^F_x et \mathbf{M}^F_y , et de l'effort normal de compression *N*, dont la variation est susceptible de produire des déformations longitudinales ϵ_{zz} .

La connaissance de ces grandeurs (*N*, \mathbf{M}^F_x et \mathbf{M}^F_y), à un instant donné, permet d'écrire, sur les champs de contraintes σ_{zz} dans la section droite, des conditions intégrales d'équilibre. Elle ne donne par contre aucune indication sur la répartition de ces contraintes, qui dépend de toute l'histoire de la croissance de l'arbre et de ses chargements, externes (poids) ou internes (ma-

turation) (Fournier, 1989). Il faut donc éviter d'employer les termes de «face tendue» ou «comprimée» en référence à la direction supposée du moment fléchissant.

L'effort supporté et la réponse, en termes de déformations ϵ_{zz} , du tronc à une suppression ou modification de cet effort ne dépendent, localement (au niveau de la section droite), que de la partie de l'arbre située au-dessus de cette section. C'est pourquoi, il n'a pas été tenu compte de la nature de l'encastrement dans la modélisation. Comme souligné par Langbour (1989), le rôle des racines (la nature de l'encastrement) devra être envisagé ultérieurement pour aborder la qualification des déplacements du tronc (mesures de flèches) et des situations d'instabilité en cas de surcharge (masse de neige, de givre...).

En s'appuyant sur la schématisation géométrique du chapitre précédent, l'effort normal de compression et les moments fléchissants exercés par le poids propre sup-

porté dans la bille de pied vont être évalués au niveau d'une section droite de référence située à hauteur de poitrine $l_0 = 1,3$ m.

Notons P_h le poids du houppier, décomposons le fût en une bille de pied de longueur 2,5 m et n billons élémentaires, de poids P_i ($i = 1 \dots n$), de longueur $l = 2,5$ m (fig 3).

L'effort normal N_1 et les moments fléchissants M_{1x}^F et M_{1y}^F exercés par le houppier seul sur la section droite considérée, sont, tous calculs faits (Fournier, 1989) :

$$N_1 = -P_h \cos \alpha \quad M_{1x}^F = -P_h e \sin \delta \quad M_{1y}^F = +P_h e \cos \delta \cos \alpha$$

En ajoutant l'action des n billons du fût incliné, les efforts totaux N_2 , M_{2x}^F et M_{2y}^F sont :

$$N_2 = -(P_h + \sum_{i=1}^n P_i) \cos \alpha$$

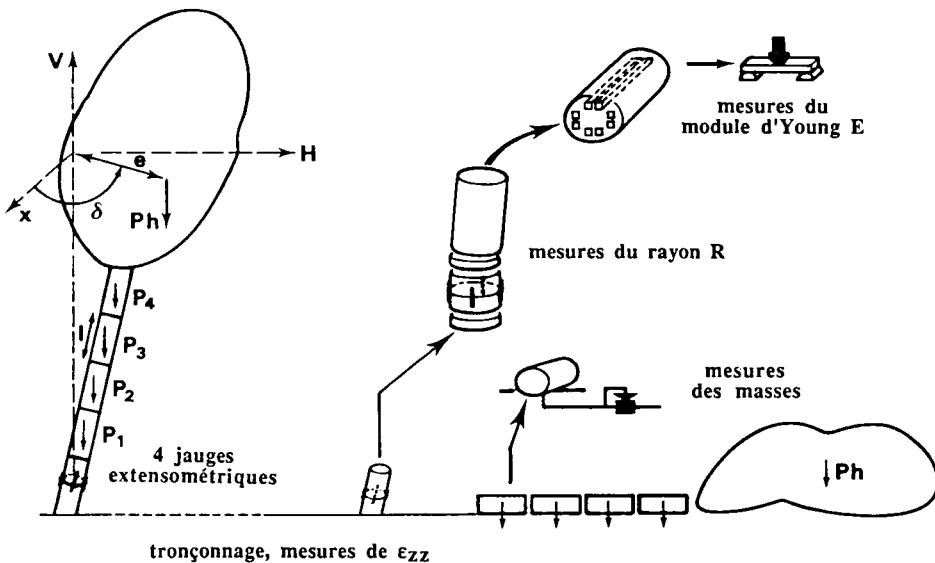


Fig 3. Protocole expérimental appliqué à chaque arbre de l'étude : extensométrie, mesure des masses, mesures des modules d'élasticité du matériau, caractéristiques de la section droite.

$$\mathbf{M}_{2x}^F = -P_h e \sin \delta - \sum_{i=1}^n P_i e_i$$

avec $e_i = [l - l_0 + (i-1) l / l_2] \sin \alpha$

$$\mathbf{M}_{2y}^F = + P_h e \cos \delta \cos \alpha$$

L'angle α , la direction \mathbf{x} (ou \mathbf{H}), l'excentricité du houppier e et sa direction δ , ont été définis au chapitre précédent et doivent être mesurés sur l'arbre sur pied. Toutes les autres données utiles (les masses et les longueurs de chaque billon, la masse du houppier) sont évaluables sur l'arbre abattu et tronçonné.

Validation de la schématisation géométrique par un essai de suppression du poids supporté.
Principe et protocole

Principe

Plus haut, nous avons proposé quelques grandeurs dendrométriques pour estimer les paramètres déterminant les efforts induits par le support d'un poids et indispensables à mesurer sur l'arbre debout avant abattage et tronçonnage. Le bien fondé de la schématisation est maintenant testé par la mesure, en termes de déformations longitudinales, de l'effet de la suppression de ce poids.

La variation d'état mécanique étudiée est due au tronçonnage de l'arbre à 2,5 m du sol, qui impose un torseur opposé à celui initialement supporté. Entre l'état initial où l'arbre est debout et l'état final après tronçonnage, le bois de la section droite est le siège d'un champ de déformations dont on se propose d'évaluer la composante longitudinale $\varepsilon_{zz}(r, \theta)$, en fonction de l'effort supprimé, de la géométrie de la section droite, des propriétés du matériau

bois. Ce matériau est assimilé à un matériau élastique, dont le comportement ne dépend de l'humidité qu'au-dessous du point de saturation des fibres.

Le matériau est anisotrope, en première approximation orthotrope cylindrique dans le référentiel du tronc : on remarque (Fournier, 1989) que la résistance des matériaux classique (établie pour des poutres isotropes transverses) donne une excellente approximation des déformations longitudinales (différences inférieures à 0,05%) d'un tronc orthotrope cylindrique soumis à un effort de traction-compression ou de flexion pure, à condition de prendre pour module d'élasticité E du matériau le module longitudinal du bois E_L .

La section droite d'un tronc d'arbre est généralement hétérogène (présence de bois juvénile, de bois de réaction, d'une alternance bois initial-bois final...). L'étude de l'influence de ces hétérogénéités sur la réponse de la structure à une flexion pure, entreprise par ailleurs (Fournier, 1989) montre que :

– la présence d'une hétérogénéité radiale $E(r)$ conduit à définir E comme un module homogène équivalent, caractéristique de la section droite

$$E = \frac{\pi}{I} \int_0^R E(r) r^2 (r dr d\theta)$$

essentiellement gouverné, du fait de la pondération par r^2 , par le comportement des parties externes du tronc (les plus sollicitées par l'effort de flexion);

– la présence d'une face plus rigide (hétérogénéité circonférentielle classique de la présence de bois de réaction), entraîne un déplacement de la fibre neutre vers cette face. L'expérience montre toutefois que compte tenu des ordres de grandeur mesurés de cette hétérogénéité (variation de module de l'ordre de 10%), la résistance des matériaux classique des poutres

homogènes donne une bonne approximation des déformations ϵ_{zz} (à quelques % de la valeur maximale), en prenant comme module élastique de la section droite E , le module moyen du bois sur la circonférence.

$\epsilon_{zz}(r, \theta)$ est donc estimé en utilisant les formulations classiques de la résistance des matériaux (Laroze, 1980), soit :

$$\epsilon_{zz}(r, \theta) = \frac{(-N)}{Es} + \frac{(-M_x^F)}{Ei} r \sin \theta - \frac{(-M_y^F)}{Ei} r \cos \theta$$

où E est le module d'élasticité de la section droite. E sera estimé par des essais quasi-statiques conventionnels dans la direction longitudinale (Guitard, 1987) (dont la durée est comparable à celle des essais *in situ*), sur éprouvettes de bois vert, débitées dans les parties externes du tronc, en faisant la moyenne des valeurs mesurées sur la circonférence. r, θ sont les coordonnées polaires d'un point de la section droite, supposée circulaire, de rayon R ; $s = \pi R^2$ est l'aire de la section droite, $i = \pi R^4/4$ est son inertie à la flexion. Dans ce qui suivra ϵ_{zz} , qui représente une elongation ou une contraction relative ($\Delta\lambda/\lambda$, λ est la longueur de la base de mesure), sera exprimé en microdéformations ($\epsilon_{zz} \times 10^{-6}$, abréviation μdef).

Deux schématisations seront envisagées :

- la plus simple considère que, compte tenu des ordres de grandeurs des masses et excentricités des billons, l'action du seul houppier est prépondérante sur celle du fût, et donc $N = N_1$, $M_x^F = M_{1x}^F$ et $M_y^F = M_{1y}^F$;

- la plus complexe prend en compte les efforts exercés par le houppier et le fût supposé rectiligne, incliné, soit $N = N_2$, $M_x^F = M_{2x}^F$ et $M_y^F = M_{2y}^F$.

La figure 4 montre l'allure d'une distribution théorique de ϵ_{zz} calculée en tout point (R, θ) de la surface du tronc $r = R$, en prenant en considération, l'action du houppier seul dans un premier temps, l'action globale du houppier et du fût ensuite, représentée en fonction de la coordonnée angulaire θ qui repère un point de la circonférence.

On s'attend donc à enregistrer à la périphérie du tronc, une déformation longitudinale, de valeur moyenne positive (l'effort normal est une tension égale à la résultante des poids supprimés) et évoluant de façon sinusoïdale sur la circonférence du fait du moment fléchissant supprimé. Si le fût est vertical ($\alpha = 0$), le moment n'est dû qu'au poids du houppier excentré ($M_2^F = M_1^F$) et est donc perpendiculaire à la direction δ qui devient l'axe des déformations maximales. Dans le cas général où le houppier excentré est développé dans une autre direction que celle de l'inclinaison du fût qui participe au moment ($\delta \neq \pm \pi/2$), il y a suppression du moment dû au poids du

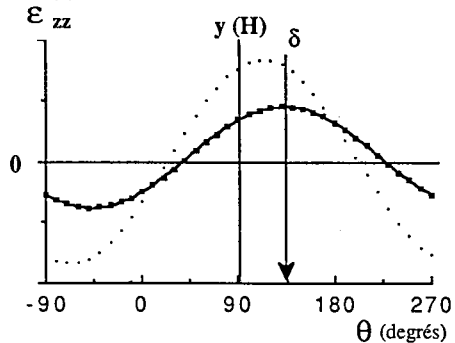


Fig 4. Allure générale des déformations longitudinales ϵ_{zz} aux points de la circonférence (repérés par l'angle θ) de l'arbre, dues à la suppression de la masse supportée. \longleftrightarrow déformations calculées en tenant compte du poids du houppier seul; \dots déformations calculées en tenant compte des poids du fût et du houppier, $\theta = 90^\circ$ est la direction vers laquelle le fût penche (direction H), δ est la direction dans laquelle le houppier est excentré.

fût, porté par x , et de celui dû au houppier. L'axe des déformations maximales est alors intermédiaire, entre Oy et la direction δ .

Protocole expérimental

La campagne a été menée au cours de l'été 1987. Les individus sont issus du populetum de Velaine-sous-Amance (Meurthe-et-Moselle), plantés avec un espacement de 3,5 m x 3,5 m ou 7 m x 7 m. Ils ont un âge moyen de 30 ans (plantation de 1957 à 1961) et proviennent de plants (0–2 ans en pépinière) issus de graines (croisements contrôlés). La hauteur moyenne des arbres était de 24,5 m; leur circonférence moyenne à 1,30 m de 76 cm. L'origine de chaque individu est détaillée sur le tableau I.

Mesures dendrométriques préliminaires (tableau I)

L'excentricité du houppier e et sa direction δ sont préalablement déterminées selon la méthode décrite précédemment, de même que l'inclinaison α et la direction H , sur une base de mesure $L = 1$ m.

Extensométrie

Quatre jauges extensométriques (de type Techdis PR 10, longueur 10 mm) sont collées en quadrature sur la circonférence à hauteur de poitrine sur le bois de l'arbre sur pied juste sous le cambium (après écorçage et préparation de la surface) et sont reliées à un pont d'extensométrie de chantier. Une fois la référence prise, l'arbre est tronçonné à 2,5 m, puis, les déformations résultantes sont immédiatement relevées. L'utilisation de jauges extensométriques sur bois vert, et en forêt, a surtout été utilisée (Archer, 1986) pour l'étude des contraintes de croissance, dans le but de mesurer des déformations de l'ordre de $\epsilon = 1000 \mu\text{def}$, avec une sensibilité utile d'environ $100 \mu\text{def}$. Ici, notamment parce que l'ordre de grandeur de ϵ_{zz} mesuré est de $100 \mu\text{def}$, la technique a fait l'objet de mises au point et d'essais préalables au laboratoire où la sensibilité des mesures est portée à $\Delta\epsilon = \pm 10 \mu\text{def}$.

Mesures complémentaires après abattage : masses, caractéristiques de la section droite et du matériau

L'ensemble de la tige abattue est immédiatement pesé; les données conservées sont les poids des quatre billons de 2,50 m formant le fût et le poids cumulé du reste de la tige et des branches constituant le houppier (les arbres ont une hauteur totale de 20–25 m, les premières branches vivantes se situent entre 10 et 13 m de haut).

Le tronçon de tige qui reste debout est ensuite abattu, et 2 rondelles sont découpées juste en dessus et en dessous de la section des mesures. Leur contour est décalqué sur papier, puis découpé; l'aire s de la section est alors évaluée par pesée en utilisant le grammage du papier (préalablement vérifié). Le rayon moyen R s'en déduit ($R^2 = s / \pi$).

Enfin, le module d'élasticité de la section droite E est estimé à partir de la rigidité moyenne de 8 éprouvettes de bois vert de dimensions normalisées testées en flexion 3 points [E étant évalué dans les conditions de la norme NF B51008, sans tenir compte de l'influence du cisaillement (Guitard, 1987)]. Ces éprouvettes sont débitées immédiatement au-dessus de la section des mesures, extraites de l'aubier en 4 zones de la circonférence en quadrature (fig 3).

RÉSULTATS

Morphologie des individus

Le tableau I montre les valeurs estimées de l'inclinaison α , de l'excentricité de la cime e , et de sa direction δ , pour chaque individu. Il apparaît que :

- pour les 5 individus (1, 2, 3, 6, 7) qui ont l'excentricité la plus marquée ($> 0,70$ m), la direction de cette excentricité δ accompagne la direction H (90°) de l'inclinaison locale de l'arbre : ces individus sont qualifiés d'inclinés;
- un individu (9) présente une excentricité relativement importante (0,66 m), dans

Tableau I. Description des 9 individus. L'inclinaison basale est mesurée entre 1,30 et 2,30 m. L'excentricité du houppier et sa direction sont déduites du relevé de 8 rayons du houppier. La masse du houppier est définie comme la masse de l'arbre située au dessus de 12,5 m. Le module d'Young est la moyenne des valeurs mesurées sur 8 éprouvettes débitées dans l'aubier et testées en flexion 3 points.

Arbre N°	Inclinaison basale α (deg)	e (m)	Excentricité du houppier δ (deg)	Conformation	Origine	Hauteurs (m)		Diamètre (à 1,30 m) (cm)	Masse houppier (kg)	Masse totale (kg)	E (MPa)	
						Totale	1 ^{re} grosse branche					
1	0.08	4.6	2.49	44	-45	inclinée	Pop tremula x Pop alba	12,5	25,5	268	558	8125
2	0.01	0,6	0,75	128	+38	inclinée	Pop alba x Pop tremuloïdes	14	23	179,3	428	6345
3	0.07	4,0	1,68	94	+4	inclinée	Pop alba x Pop tremuloïdes	11,5	21,5	142,6	347,6	5895
4	0.035	2,0	0,33	17	-73	droite	Pop alba x Pop tremuloïdes	10,5	24	190,9	467	7470
5	0.015	0,9	0,34	267	+177	droite	Pop alba x Pop tremuloïdes	15	26	232,7	552,2	7720
6	0.04	2,3	0,76	112	+22	inclinée	Pop alba x Pop tremuloïdes	14,5	22,2	126,4	336	7560
7	0.05	2,9	1,40	63	-27	inclinée	Pop tremuloïdes x Pop nivea	12	22,5	145,9	361	7360
8	0.065	3,7	0,34	-64	-154	flexueuse	Pop tremula	13,5	26,5	341,8	693	7580
9	0.03	1,7	0,66	-40	-130	flexueuse	Pop tremula	13	26	312,8	622	8715

une direction -40° qui n'a rien à voir avec la direction 90° de l'inclinaison locale. Cet arbre a été qualifié de flexueux;

– l'individu (8) présente une faible excentricité (0,34 m) dans une direction -64° quasiment opposée à la direction H, mais une forte inclinaison locale ($\text{tg } \alpha = 0.065$). Pour ces raisons (différentes du cas précédent), il est aussi qualifié de flexueux;

– les 2 individus (4,5) restants présentent une faible excentricité e et une faible inclinaison α , ils obtiennent le titre d'arbre "droit".

Ces qualificatifs, justifiés ici par des considérations quantitatives sur les quelques grandeurs dendrométriques mesurées, avaient été utilisés a priori sur le terrain, au vu de la physionomie générale des arbres (tige et houppier).

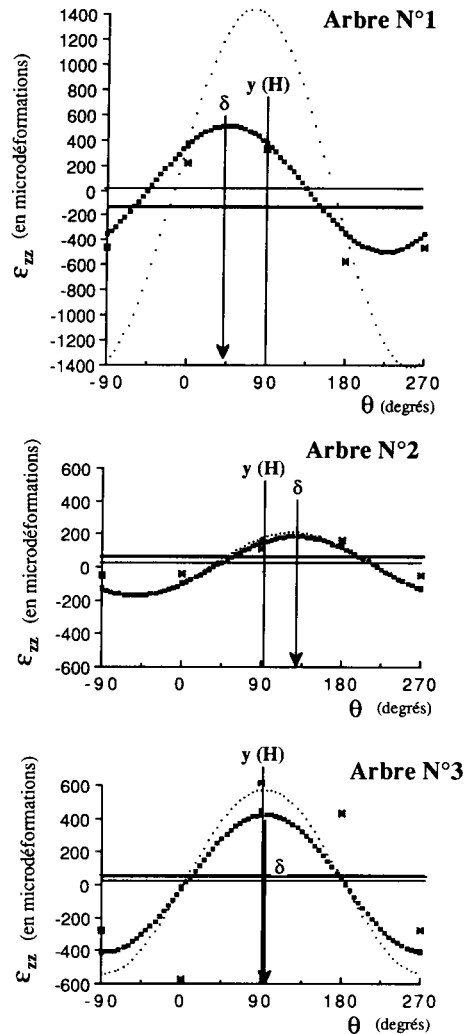
Déformations ε_{zz}

Les déformations théoriques sont calculées et représentées sur la figure 5 en tout point (R, θ) de la surface du tronc pour chaque individu. Ces valeurs sont superposées aux quatre déformations mesurées.

Les déformations mesurées ou théoriques n'ont jamais le même signe sur les quatre points en quadrature de la surface du tronc et montrent donc une face «comprimée» qui «s'allonge» (où ε_{zz} est positive) opposée à une face «tendue» qui «se raccourcit» (où ε_{zz} est négative). La théorie prédit que la valeur moyenne des déformations en quatre points en quadrature, qui résulte de l'effort normal, est positive de l'ordre de 20 à 50 μdef . Cette valeur (calculée en prenant en compte le houppier et le fût, et représentée sur les figures en trait fin continu) est donc proche de l'incertitude expérimentale; la sensibilité de la mesure de ε_{zz} est de $\pm 10 \mu\text{def}$ et la

position angulaire des jauges est estimée à quelques degrés près. La valeur moyenne des quatre déformations mesurées, représentée en trait gras continu, est positive ou négative, inférieure en valeur absolue à 60 μdef excepté sur les individus 1 et 6.

Bien que nous ayons pris soin de tronçonner loin de la section des mesures (à environ 4 diamètres), l'enregistrement de



retraits moyens relativement importants comme sur l'arbre 1 (où la valeur moyenne des déformations mesurées est de $-125 \mu\text{def}$) pourrait être le fait d'un début de libération de la forte tension interne périphérique de maturation présente dans tous les

arbres. Cette tension est de fait connue pour entraîner des retraits globaux importants (supérieurs à $1\ 000 \mu\text{def}$) près de la surface tronçonnée, dont les effets ne sont en principe plus visibles (à 5% près) à 2 diamètres de cette extrémité (Archer,

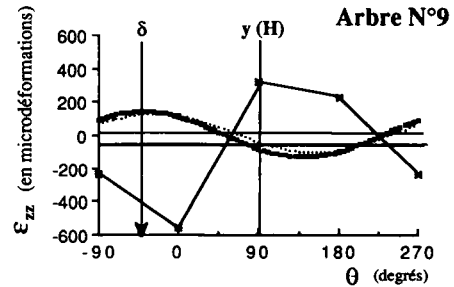
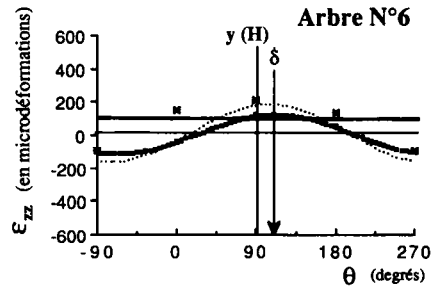
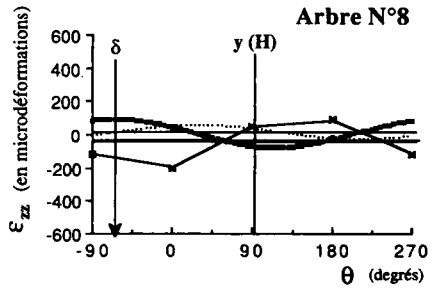
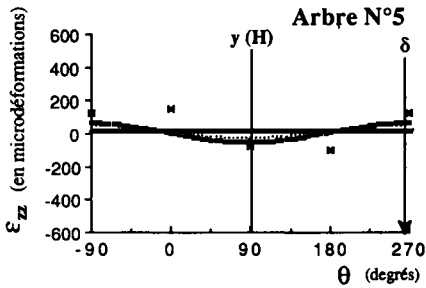
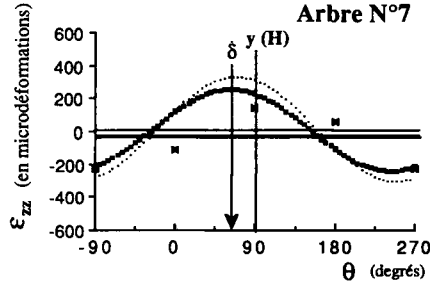
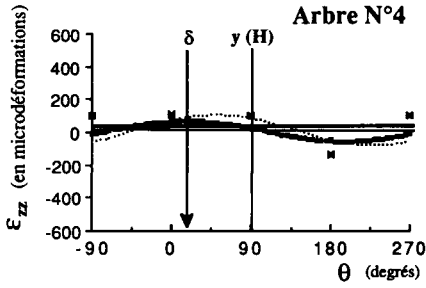


Fig 5. Déformations longitudinales dues au tronçonnage de l'arbre de 1,30 m, pour les 9 arbres testés. ■ ■ ■ déformations calculées en tenant compte du poids du houppier seul; ···· déformations calculées en tenant compte des poids du fût et du houppier; x déformations mesurées aux quatre points ($\theta = -90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 270^\circ$; — déformation moyenne théorique (poids du fût et du houppier); — déformation moyenne mesurée.

1986; Fournier, 1989). Les trois élongations positives observées sur l'arbre (6) sont plus difficilement explicables.

L'essai ne permet donc pas la mesure des effets de la masse seule, mais caractérise le moment fléchissant supporté, qui intègre la masse et son bras de levier. Même sur les individus qualifiés de droit, l'effet du moment fléchissant est prépondérant sur celui de l'effort normal : l'arbre étant une structure très élancée, le support du poids se traduit essentiellement par un effort de flexion. Des résultats analogues ont déjà été mesurés par Guéneau (1974), Okuyama *et al* (1983), ou Yamamoto *et al* (1989).

Les courbes théoriques suggèrent que l'action du houppier est prépondérante sur celle du fût incliné (les deux courbes sont très proches, en intensité, et en phase). Les valeurs expérimentales ne sont pas plus proches de la courbe provenant de la schématisation la plus complexe «houppier + fût incliné» que de celle n'intégrant que l'action du seul houppier.

La face «comprimée» s'écarte parfois sensiblement de la direction 90° de l'inclinaison basale α du fût mesurée à 1,3 m, et est essentiellement gouvernée par la direction δ de l'excentricité du houppier : pour évaluer l'effort de flexion dû au poids total supporté, l'analyse de la morphologie de la cime qui ne se développe pas forcément dans la direction vers laquelle la bille de pied s'incline, est un meilleur indicateur que les mesures d'inclinaison à la base de l'arbre. Par exemple, sur l'individu où l'excentricité du houppier est mesurée dans la direction 267° (tableau I), la face située dans la direction d'inclinaison (au demeurant très faible) de la bille de pied, est «tendue». Sur l'individu (1), pour lequel $\delta = 44^\circ$, l'élongation maximale mesurée se trouve décalée entre 0 et 90°. Sur l'individu 2, pour lequel $\delta = 128^\circ$, elle se situe entre 90 et 180° plutôt que centrée sur 90°.

Sur les 7 premiers individus, droits ou inclinés, les positions des faces «tendues» et «comprimées», évaluées par les critères géométriques choisis et les masses mesurées, coïncident assez correctement avec celles observées. Malgré l'estimation grossière du centre de gravité du houppier par son assimilation au centre géométrique de sa projection, l'évaluation par le modèle de l'amplitude maximale des déformations est bonne, et permet a priori d'associer des déformations maximales de l'ordre de 500 μdef à de fortes excentricités $e > 1,5$ m (arbres 1 et 2) et des déformations maximales inférieures à 200 μdef à des excentricités $e < 0,8$ m (individus 2, 4, 5, 6).

Par contre, sur les individus «flexueux» (8 et 9), les résultats expérimentaux sont en désaccord complet (écart d'environ 180°) avec les prévisions. La compréhension de la réponse de ces individus réclame à l'évidence une analyse de la flexuosité de la tige et une meilleure définition du centre de gravité du houppier.

CONCLUSIONS

Le poids propre supporté par un arbre, structure très élancée, agit essentiellement en flexion, même sur un arbre apparemment droit. La connaissance de la masse supportée n'est donc pas une donnée suffisante; il est nécessaire, pour évaluer le moment fléchissant résultant sur la section droite, de connaître également le bras de levier, c'est-à-dire la position du centre de gravité qui ne peut être estimée qu'en référence à l'arbre sur pied.

Nous avons choisi d'estimer ce bras de levier à partir d'une schématisation simple de l'arbre (fût rectiligne incliné et houppier) qualifiable à partir de relevés géométriques usuels : l'inclinaison du fût à hauteur de poitrine, et la mesure de la projection horizontale du houppier par huit rayons,

qui permet habituellement de déterminer l'aire de la surface projetée, et qui a été ici utilisée pour estimer une donnée supplémentaire, la position du centre géométrique de cette surface. L'analyse des résultats a fait apparaître une typologie des individus en trois classes de conformations «inclinés», «droits» ou «flexueux».

L'expérimentation sur 9 peupliers a alors montré que l'interprétation nécessite l'estimation de l'excentricité du houppier et de sa direction, informations plus pertinentes que la mesure de l'inclinaison de la bille de pied. Cette interprétation est claire dans le cas d'individus de conformation simple «inclinés» ou «droits», plus délicate pour les individus «flexueux». Lorsqu'on s'intéressera spécifiquement à l'étude d'essences présentant un port et une conformation sinueuse, d'individus dominés ou d'arbres de lisières, qui se tordent, se penchent et se redressent, la schématisation géométrique devra être affinée, en adjoignant d'autres critères morphologiques, évaluables sur le terrain ou à partir de photographies traitées au laboratoire. Des études complémentaires, utilisant comme matériel d'étude le pin maritime, sont en cours au laboratoire de rhéologie du Bois de Bordeaux.

Enfin, les résultats de cette étude de qualification «statique» des efforts induits par un poids sont un pré-requis pour aborder les problèmes soulevés en introduction :

– pour expliquer et interpréter l'apparition de bois de réaction (tension ou compression) et de niveaux de contraintes internes élevés sur les feuillus, il est utile de qualifier les variations de ces efforts gravitationnels de flexion et les réponses successives de l'arbre au cours de sa croissance à ces variations (Okuyama *et al*, 1983; Fournier, 1989; Yamamoto *et al*, 1989);

– la compréhension des états limites de l'arbre (casse du tronc ou des racines, arrachement) soumis à une surcharge (poids de neige, de givre, vent) demande de qualifier le chargement additionnel dû au poids propre supporté : cette masse ajoute en effet un effort supplémentaire dans le domaine des grands déplacements (Langbour, 1989); d'autre part, la qualification du comportement dynamique de l'arbre (balancement, modes propres de vibration) réclame celle de la répartition des masses.

RÉFÉRENCES

- Archer RR (1986) *Growth stresses and strains in trees*. (Timell E, ed) Springer Verlag
- Fournier M (1989) Mécanique de l'arbre sur pied: maturation, poids propre, contraintes climatiques dans la tige standard. Thèse INP Lorraine
- Guéneau P (1974) Contraintes de croissance. Méthode de mesure sur pied, échantillonnage, premiers résultats. Rapport 1, Centre Technique du Bois
- Guitard D (1987) *Mécanique du matériau bois et composites*. Cépadués Editions, collection Nabla
- Langbour P (1989) La rigidité de l'arbre sur pied, indicateur de l'élasticité longitudinale des bois. Application aux peupliers. Thèse INP Lorraine
- Laroze S (1980) *Résistance des matériaux et structures. Tome 2 : Théorie des poutres*. Eyrolles, Masson
- Okuyama T, Kawai A, Kikata Y (1983) *Growth stresses and uneven gravitational-stimulus in trees containing reaction Wood*. Mokuzai Gakkaishi 29, 190-196
- Pardé J, Bouchon J (1988) *Dendrométrie*. 2^e ed, ENGREF Nancy
- Yamamoto H, Okuyama T, Iguchi M (1989) *Measurement of growth stresses on the surface of a leaning stem*. Mokuzai Gakkaishi 35, 595-601